

**Universitat Politècnica de València**

**Programa de Doctorado en Diseño,  
Fabricación y Gestión de Proyectos Industriales**

**PROCEDIMIENTO FUNDAMENTADO EN LA  
PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA  
SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN  
PROYECTOS DE NATURALEZA COMPLEJA  
Y CON OBJETIVOS MÚLTIPLES**

**Doctorando: Nolberto Munier**

**Directores:**

**Dr. Pablo Aragonés Beltrán, Universitat Politècnica de València**

**Dr. Fernando Jiménez Sáez, Universitat Politècnica de València**

**Valencia, Setiembre de 2011**



## AGRADECIMIENTOS

Deseo dejar constancia de mi reconocimiento a mis dos Directores de Tesis:

Dr. Pablo Aragonés Beltrán y Dr. Fernando Jiménez Sáez de la Universidad Politécnica de Valencia que aunaron esfuerzos para hacerme comprender aspectos que hoy me resultan obvios, pero que no lo fueron para mí en su momento. Deseo agradecer su guía, su paciencia, su buena voluntad y su firmeza para hacerme consciente cuando estuve equivocado, como también sus palabras de aliento cuando estaba por el buen camino.

Hago extensivo mi agradecimiento a:

Dr. Enrique Calderón Banzategui, quien hace ya años evaluó y confió en un rudimentario esquema del método Simus, recomendó su aplicación en una población española y me introdujo en un importante organismo internacional en donde me fue posible exponer el método.

Dr. Javier Curiel Díaz que me brindó, aparte de su inestimable amistad, la riqueza de sus sugerencias y consejos.

Dr. Francisco Guijarro Martínez, por su desinteresada ayuda y por sus agudos planteos, que me hicieron pensar...lo cual, indudablemente benefició al método.

Dr. Carlos Romero López quien me brindó la dosis de confianza que necesitaba al avalar un nuevo método matemático y que aportó muy útiles sugerencias.

A directores de planeamiento urbano en las ciudades de Córdoba y San Francisco (Argentina), Santo André (Brasil), Hull y Clarence-Rockland (Canadá), León (España), Rotterdam (Holanda), Guadalajara y León (México), Ministerio del Medio Ambiente (Gobierno de Canadá), Banco Mundial (EE.UU) que facilitaron información estadística para la aplicación del método en sus respectivas ciudades y entornos, y de los cuales extraje una gran experiencia que se volcó en esta tesis.

La génesis de este trabajo se remonta a muchos años atrás cuando en la Universidad Nacional de Buenos Aires, y de la mano de mi maestro, el ingeniero Isidoro Marín, aprendí los rudimentos de la Programación Lineal, técnica que me fascinó desde entonces cuando alcancé a ver sus posibilidades. Este trabajo puede considerarse como una materialización de ese anhelo de emplear esta magnífica herramienta en otras actividades.



**A mi madre Isabel, mi padre Ángel, hermana Haydée, y tíos  
Rosa y Antonio, in memoriam**

**A mi esposa Alicia, y a mis hijos Daniel y Michelle quienes  
compartieron y comparten mis inquietudes y de quienes recibí  
el mejor apoyo y aliento que alguien pueda pedir**



# TABLA DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO .....	2
1.3 LA NATURALEZA DEL PROYECTO COMPLEJO .....	4
1.4 DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO .....	6
<b>CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS EXISTENTES PARA LA TOMA DE DECISIONES ....</b>	<b>7</b>
2.1 ANTECEDENTES .....	7
2.2 NECESIDAD DE DISPONER DE MODELOS MATEMÁTICOS .....	8
2.2.1 Familias de métodos .....	8
2.3 MÉTODO ELECTRE ( <i>ÉLIMINATION ET CHOIX TRADUISANT LA RÉALITÉ</i> ) .....	8
2.3.1 Fundamentos del método .....	8
2.3.2 Aplicaciones .....	10
2.4 MÉTODO PROMETHEE ( <i>PREFERENCE RANKING ORGANIZATION METHOD FOR ENRICHMENT EVALUATIONS</i> ) .....	10
2.4.1 Fundamentos del método .....	10
2.4.2 Operación .....	12
2.4.3 Aplicaciones .....	12
2.5 MÉTODO AHP ( <i>ANALYTIC HIERARCHY PROCESS</i> ) .....	12
2.5.1 Fundamentos del método .....	12
2.5.2 Mecánica y etapas del método .....	13
2.5.2.1 Determinación de pesos de los criterios .....	13
2.5.2.2 Valoración de alternativas .....	14
2.5.3 Aplicaciones .....	14
2.5.4 Método ANP ( <i>The Analytic Network Process for Decision Making with Dependence and Feedback</i> ) .....	15
2.6 MÉTODO MULTI-ATTRIBUTE UTILITY THEORY (MAUT) .....	15
2.7 MÉTODO DE PROGRAMACIÓN LINEAL (PL) .....	16
2.7.1 Breve historia de la técnica .....	16
2.7.2 Fundamentos de la Programación Lineal .....	16
2.7.3 Metodología de la PL aplicada la resolución problemas de decisión .....	19
2.7.4 Modelado de una situación real .....	21
2.7.5 Aplicaciones .....	21
2.7.6 Fundamentos de la Programación por Metas ( <i>Goal Programming</i> ) .....	22
2.7.7 Método Simplex multiobjetivo .....	22
2.8 MÉTODO TOPSIS ( <i>TECHNIQUE FOR ORDER PREFERENCE BY SIMILARITY TO IDEAL SITUATION</i> ) .....	23
2.8.1 Fundamentos del método .....	23
2.8.2 Aplicaciones .....	24
2.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ALCANZADOS POR LOS DISTINTOS MODELOS EN UN CASO ESPECÍFICO .....	24
2.9.1 Estudio comparativo de un caso: Revalorización del aeropuerto de Maastricht .....	24
2.9.2 Resumen sobre las dificultades encontradas .....	25
2.10 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS .....	25
<b>CAPÍTULO 3 EL PROCEDIMIENTO SIMUS .....</b>	<b>27</b>

3.1 FUNDAMENTOS DE SIMUS .....	27
3.1.1 <i>Análisis del problema y relación con otras técnicas afines</i> .....	27
3.1.2 <i>Mecánica operativa</i> .....	28
3.1.3 <i>Arquitectura de Simus</i> .....	29
3.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA APLICACIÓN DE SIMUS A PROBLEMAS DE TIPO 1.....	30
3.2.1 <i>Fuentes</i> .....	30
3.2.2 <i>Fase de Análisis</i> .....	32
3.2.3 <i>Fases de modelación y resultados</i> .....	34
3.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA APLICACIÓN DE SIMUS A PROBLEMAS DE TIPO 2 .....	35
3.3.1 <i>Fuentes</i> .....	35
3.3.2 <i>Fase de Análisis</i> .....	35
3.3.3 <i>Fases de modelación y resultados</i> .....	36
DÉCIM 3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS .....	36
3.4.1 <i>Explicación y empleo del Módulo 1</i> .....	36
3.4.2 <i>Explicación y empleo del Módulo 2</i> .....	39
3.4.2.1 <i>Ejemplo ilustrativo de la aplicación de los módulos 1 y 2</i> .....	40
3.4.3 <i>Equivalencia del resultado alcanzado por Simus</i> .....	44
3.4.4 <i>Calculo de la entropía para cada conjunto de resultados</i> .....	44
3.4.5 <i>Explicación y empleo del Módulo 4</i> .....	45
3.4.5.1 <i>Explicación detallada de los pasos a seguir para aplicar el módulo 4</i> .....	46
3.4.6 <i>Cuadro sinóptico de funciones monoobjetivo y multiobjetivo y módulos a emplear</i> .....	47
3.4.7 <i>Análisis de sensibilidad</i> .....	48
<b>CAPÍTULO 4 CASOS DE ESTUDIO .....</b>	<b>51</b>
4.1 RESOLUCIÓN POR SIMUS DE UN PROBLEMA REAL COMPLEJO - CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS ALCANZADO CON ELECTRE .....	51
4.1.1 <i>Antecedentes</i> .....	51
4.1.2 <i>Resolución por Simus utilizando los Módulos 1 y 2</i> .....	51
4.1.3 <i>Correlación entre los resultados de ambos métodos</i> .....	57
4.1.4 <i>Análisis del resultado</i> .....	59
4.1.5 <i>Conclusión de este ejemplo</i> .....	60
<b>CAPÍTULO 5 COMENTARIOS SOBRE ARTÍCULOS PUBLICADOS EN EL COMPENDIO.....</b>	<b>61</b>
5.1 ARTÍCULO PUBLICADO EN 'ECOLOGICAL INDICATORS' 11(2011) 1020-1026.....	61
5.1.1 <i>Descripción del problema</i> .....	61
5.1.2 <i>Indicadores relacionados con los criterios de selección y estimación de su importancia absoluta</i> .....	62
5.1.3 <i>Criterios de selección</i> .....	63
5.1.4 <i>La función objetivo</i> .....	64
5.1.5 <i>Discusión del resultado de la metodología propuesta</i> .....	64
5.1.6 <i>Elección del tamaño del conjunto seleccionado</i> .....	66
5.1.7 <i>Otra versión del modelo</i> .....	67
5.1.8 <i>Conclusión</i> .....	67
5.2 ARTÍCULO PUBLICADO EN 'ENVIRONMENT, DEVELOPMENT AND SUSTAINABILITY'- VOLUME 8, NUMBER 3, 425-443 .....	67
5.2.1 <i>Antecedentes</i> .....	67
5.2.2 <i>Empleo de la Programación Lineal</i> .....	68
5.2.3 <i>Resultado</i> .....	70
5.2.4 <i>Análisis del resultado</i> .....	70
5.3 ARTÍCULO PUBLICADO EN 'RENEWABLE ENERGY' 29 (2002) 1775-1791 .....	71



5.3.1	<i>Antecedentes</i>	71
5.3.2	<i>Resolución mediante el empleo de los módulos de Simus</i>	71
5.3.3	<i>Planteamiento del problema</i>	71
5.3.3.1	Resultado del grupo AHP	72
5.3.3.2	Resultado del grupo SIMUS	72
5.3.3.3	Discusión de resultados de este caso	73
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS, REFLEXIONES Y CONCLUSIONES</b>	<b>75</b>
6.1	CONSIDERACIONES GENERALES	75
6.2	ANÁLISIS DE LAS SOLUCIONES	76
6.3	CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS	76
6.4	COMENTARIOS SOBRE LA RESOLUCIÓN DE LOS CASOS	78
6.4.1	<i>Interpretaciones sobre algunos casos analizados y su resolución por LP/Simus</i>	80
6.5	FORTALEZAS Y DEBILIDADES	84
6.6	CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO PROPUESTO	85
6.7	CONCLUSIÓN	85
	<b>RESUMEN DE ESTE TRABAJO</b>	<b>99</b>
	<b>RESUM D'AQUEST TREBALL</b>	<b>100</b>
	<b>ABSTRACT</b>	<b>101</b>
	<b>GLOSARIO</b>	<b>103</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>107</b>
	<b>ARTÍCULOS PUBLICADOS EN EL COMPENDIO</b>	<b>115</b>



# **PROCEDIMIENTO FUNDAMENTADO EN PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS EN PROYECTOS DE NATURALEZA COMPLEJA Y CON OBJETIVOS MÚLTIPLES**

**Si buscas resultados distintos  
No hagas siempre lo mismo**  
*Albert Einstein*

**La ciencia es la progresiva aproximación del  
hombre al mundo real**  
*Max Planck*

## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes y justificación**

Esta tesis está enfocada a la toma de decisiones en problemas complejos. Se entienden como tales aquellos con una gran cantidad de variables que se traducen en restricciones de tipo cuantitativo y cualitativo, con numerosas interrelaciones, tanto en las alternativas en estudio como en los criterios de decisión, y con condicionamientos de distinta índole. Por otro lado, suelen ser problemas que se caracterizan por tener que cumplir con diversos objetivos en forma simultánea y muchas veces opuestos o contradictorios.

La toma de decisiones comienza intentando modelar una situación real, pero que además debe tener en cuenta la experiencia y preferencias del centro decisor - ya que es una actividad subjetiva – por lo que, considerando la cantidad de variables a manejar, los criterios para evaluar las diversas opciones o alternativas, y la complejidad del problema, se hace pertinente el empleo de modelos matemáticos que organicen la información, ejecuten determinados algoritmos de resolución y que arrojen un resultado, que puede ser aceptado, rechazado o modificado por el centro decisor.

Estas técnicas matemáticas son una ayuda para la toma de decisiones, que apoyan al centro decisor para gestionar la información, y por otro lado facilitan su labor al permitirle analizar distintas soluciones cuando se cambian determinados parámetros, procedimiento que se conoce como *análisis de sensibilidad*, y que puede arrojar mucha luz sobre un caso determinado.

Este trabajo propone un nuevo procedimiento, apoyado en la *Programación Lineal (PL)* cuando analiza problemas discretos, es decir con una cantidad limitada de alternativas y con un gran número de criterios. La PL no es una técnica moderna, es anterior a mediados del siglo XX. Tiene un desarrollo axiomático impecable y es muy apta para resolver problemas de decisión. Sin embargo, posee dos debilidades que son a) la necesidad de trabajar con criterios cuantitativos y b) el trabajar con un solo objetivo.

En casos en donde estas debilidades no afectan a la resolución del problema, como por ejemplo en la determinación de los distintos tipos de productos que una planta industrial puede producir, en el análisis financiero de portfolios, o en el estudio de cuencas hídricas, por citar solo algunos, la técnica arroja valores óptimos, y en este tipo de entorno se ha utilizado y aplica a numerosos proyectos de distinta índole.

También hubo intentos de emplear la PL en la resolución de problemas con múltiples objetivos, y así nacieron metodologías como la programación por metas (Charnes *et al*, 1961), el Simplex Multicriterio (Steuer, 1989), el método de restricciones con parametrización, etc., pero que en general, tratan el problema desde un punto de vista eminentemente matemático y sin mucha atención a las preferencias del centro decisor y partes interesadas, como puede ser por ejemplo un sector de la población afectada por un proyecto dado, es decir proyectos en donde existe un fuerte componente cualitativo, aunque posteriormente la Programación por Metas trató de lograr un equilibrio entre el rigor matemático y las preferencias del centro decisor.

En la práctica, la mayoría de los problemas de decisión emplean en la evaluación de las alternativas criterios que responden a preferencias y magnitudes cualitativas, y también a criterios cuantitativos, manifestados mediante magnitudes concretas, y a esto hay que agregar la existencia de varios objetivos. Esto se puso de manifiesto cuando las demandas de carácter técnico, social, económico y medioambiental exigieron ser consideradas en la toma de decisiones.

Se hizo entonces necesaria la búsqueda de nuevos métodos que contemplaran estas demandas y por ello, desde fines de los 1970 aparecieron diversas técnicas que encararon la selección de manera distinta, y así se desarrollaron los métodos Electre (Roy, 1968), AHP (Saaty, 1980), Topsis (Hwang, 1981), Promethee (Brans, *et al* 1986), y otros.

## **1.2 Objetivos de este trabajo**

El objetivo principal de este trabajo es proponer un nuevo procedimiento, basado en una adaptación de la PL para facilitar la toma de decisiones en problemas complejos, aprovechando las ventajas de esta técnica, pero permitiendo también trabajar con criterios cualitativos, y considerando múltiples objetivos. Este procedimiento se denomina '*Simus*'. En esencia, pretende demostrar que la PL se puede aplicar - mediante una adaptación adecuada - a la resolución de problemas de toma de decisiones multicriterio (MCDM). El procedimiento Simus se ilustra en el Capítulo 3 mediante un esquema que abarca tres fases: Análisis, Síntesis y Evaluación.

***Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la  
selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con  
objetivos múltiples***

Es de hacer notar que en esta tesis no se propone introducir una nueva aplicación de la PL sino que se intenta ampliar el campo de acción de la misma, introduciendo una variación al método y que le permite a esta herramienta abordar problemas cuyo planteo y resolución eran imposibles, como es el caso de trabajar con cualquier cantidad de objetivos y con restricciones cualitativas.

Esta tesis es una exposición de los casos resueltos y publicados por Munier (2004, 2006 y 2011) aplicando dicho procedimiento, y es un trabajo en donde se estudia la forma de adaptar o extender la PL al problema de la toma de decisiones discreto, no importando el tipo o la naturaleza del problema de decisión. Precisamente, los tres artículos del compendio abarcan temas tan disímiles como:

1. La selección de fuentes de energía renovable para generar energía limpia,
2. La selección de alternativas en infraestructura vial en un proyecto urbano,
3. La selección de un conjunto de indicadores de sostenibilidad.

Por otro lado en la Sección 6.4 se ilustra el empleo de la técnica en 45 proyectos reales y que pertenecen a 11 categorías distintas, abarcando aspectos tales como infraestructura portuaria y aeronáutica, medioambiente, temas sociales, planeamiento económico, localización industrial, gobierno, etc.

A pesar de que la técnica descrita se puede emplear en general en cualquier tipo y tamaño de proyecto, se considera que su mayor ventaja está en su aplicación al rango de problemas complejos, es decir a aquellos con numerosas alternativas y criterios, con gran número de interrelaciones, y con requisitos propios de los mismos tales como demandas a satisfacer, protocolos a cumplir, y restricciones a respetar. El procedimiento puede entonces considerarse como una forma alternativa de afrontar un problema de toma de decisiones.

Por otro lado, el propósito enunciado se materializa mediante un objetivo doble, ya que intenta:

- a) Justificar que la aplicación de la PL que se propone puede emplearse ventajosamente para resolver problemas de naturaleza compleja, con incertidumbre y múltiples objetivos, y
- b) Demostrar que los modelos matemáticos que se han desarrollado para ayudar a la toma de decisiones deben producir resultados equivalentes cuando tratan un mismo problema.

Con respecto al primer objetivo, el trabajo aporta nuevos elementos para enfocar lo más consistentemente posible el tema de la evaluación y toma de decisiones en problemas complejos.

El segundo objetivo intenta demostrar que los modelos actualmente en uso - al menos los más empleados - al estar bien estructurados, y aunque trabajen con distintos procedimientos matemáticos, deben arrojar resultados equivalentes al resolver un mismo problema. Cuando esto no sucede, ello es atribuible a la forma diferente que tiene cada método - incluyendo Simus - a la hora de tratar la información del centro decisor. Por ese motivo, Simus aspira a mejorar la gestión de la información disminuyendo el grado de incertidumbre del centro decisor, a fin de aumentar la fiabilidad de las soluciones.

La hipótesis de equivalencia se considera importante porque permitiría comprobar, usando diferentes modelos para un mismo caso, si se alcanza una consonancia de resultados, los cuales muy probablemente corresponderían entonces a la mejor solución, no desde el punto de vista de un óptimo matemático, sino como solución satisfactoria para el centro decisor y las partes interesadas. Esta hipótesis es compartida por varios investigadores, pero aquí se intenta demostrarla heurísticamente.

Se estima importante destacar que el procedimiento alcanza, en un alto porcentaje de casos y para un mismo problema, resultados similares a los alcanzados por los otros métodos ya mencionados, a los cuales, en términos generales llamaremos '*Métodos existentes*'.

### **1.3 La naturaleza del proyecto complejo**

Como consideración significativa se entiende que la PL, mediante el complemento dado por Simus, admite encarar la resolución de proyectos de naturaleza compleja y muy compleja, nicho éste que no está lo suficientemente desarrollado. Esta reflexión se basa en el hecho de que la PL permite, debido a la formulación propia de la matriz de decisión con sus términos independientes, y de poder condicionar las soluciones, la posibilidad de representar situaciones reales, debidas a:

- Condicionamientos políticos. Cuando hay que hacer efectivo el cumplimiento de compromisos políticos (por ejemplo, necesidad de llevar a cabo obras prometidas en las campañas electorales, en donde un determinado proyecto debe ejecutarse, esté o no seleccionado por el programa de selección empleado),
- Condiciones de avance, cuando el proyecto está condicionado por la disponibilidad de fondos en un año fiscal (por ejemplo en un proyecto regional, cuando los porcentajes de avance físico deben corresponderse con los porcentajes de envío de fondos del gobierno central),
- Condiciones de borde, es decir cuando se establecen límites inferiores, superiores o intervalos para cada restricción (por ejemplo, en las descargas máximas de NOx de plantas energéticas),

***Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples***

- Condiciones de congruencia (por ejemplo, si se elige la alternativa A debe también elegirse la D),
- Condiciones de exclusión, es decir cuando es conveniente que la solución sea de tipo binario, por ejemplo cuando no interesa un ordenamiento, sino que ésta indique qué proyectos o alternativas se deben ejecutar y cuáles no, expresados los primeros con '1' y los segundos con '0'. Es decir varios '1' indican proyectos a considerar,
- Condiciones de incertidumbre (por ejemplo, en un proyecto de seguridad urbana cuando se adoptan diversas medidas para aumentarla, y que están sujetas a distintos criterios cuya eficiencia se mide en porcentaje),
- Condiciones de independencia (por ejemplo en una intersección urbana, el modelo debe determinar si es más conveniente construir un túnel, o un puente, pero no ambos, ya que son independientes),
- Condiciones de obras en ejecución, cuando hay que tener en cuenta proyectos en fase de construcción (es decir asegurarse que un proyecto que está en construcción se complete, y en consecuencia tenga prioridad sobre otros que no han comenzado aun),
- Condiciones de precedencia, es decir cuando la ejecución de un proyecto dado es posterior a la finalización de otro (por ejemplo la pavimentación de una avenida debe recién comenzarse no sólo si se realizan los trabajos de alcantarillado previstos para la misma, sino además recién cuando estos finalicen),
- Condiciones de simultaneidad, cuando se admite la acción simultánea de dos alternativas (por ejemplo, en una licitación, y en el análisis de las propuestas de los contratistas, admitir la existencia de uniones transitorias de empresas),
- Condiciones económico financieras, por ejemplo en la selección de un portfolio de proyectos en función de los fondos disponibles (como en el caso de que haya un conjunto de proyectos a realizar cuya inversión total supera a los fondos disponibles, y en consecuencia es necesario apropiar los mismos de la manera más eficiente posible),
- Trabajar con cientos o incluso miles de restricciones (por ejemplo, para proyectos que deben contemplar simultáneamente restricciones de tipo comercial, de riesgo, de seguridad, ambientales, sociales, medioambientales, de capacidad, de disponibilidad de personal y de equipos, etc.),
- Trabajar con funciones que no son lineales, por medio de su división en porciones lineales (por ejemplo, en criterios de costos fijos y variables, o en criterios que no son lineales)<sup>1</sup>, etc.

---

<sup>1</sup> En este caso debe linealizar la función, dividiéndola en segmentos lineales y aplicando PL a cada uno de ellos.

#### **1.4 Descripción del documento**

Aparte de lo comentado en este primer capítulo en donde ya se han indicado los antecedentes y objetivos del trabajo, esta tesis está organizada de la siguiente manera:

Capítulo 2: Se dedica a una revisión somera del estado del arte en lo que se refiere a los métodos existentes y a tal efecto se comentan muy brevemente los métodos Electre, Promethee, AHP, Maut, Programación Lineal, y Topsis.

Capítulo 3: Se explica el procedimiento Simus.

Capítulo 4: Casos de estudio. Empleo del método Simus en la resolución de un caso real complejo y se comparan los resultados cuando se resuelve por el método Electre.

Capítulo 5: Comentarios sobre los artículos publicados en el compendio.

Capítulo 6: Análisis de resultados, reflexiones y conclusiones. Se examinan las soluciones, y se comenta un trabajo de contrastación llevado a cabo para comparar los resultados de 45 casos reales, ejecutados por diversos investigadores y sobre una variedad de temas, con los resultados alcanzados por Simus. Se discuten las fortalezas y debilidades del método PL/Simus y se analiza el cumplimiento del objetivo propuesto en esta tesis. Se sugiere además una futura línea de trabajo que aprovechando los resultados de Simus permita emplear la técnica DEA para obtener, mediante la investigación de las fronteras eficientes, la más adecuada. De este modo el centro decisor poseería un paradigma, una solución, que es la mejor y con la cual poder comparar las soluciones que él propone.

En la conclusión se exponen las razones por la cual se considera que Simus representa un aporte significativo al problema de la toma de decisiones al introducir un concepto novedoso que permite la aplicación de una técnica poderosa como es la PL.

Resumen

Glosario de términos propios de este trabajo.

Referencias bibliográficas.

Artículos publicados en el compendio



## **CAPÍTULO 2    ESTADO DEL ARTE DE LOS MÉTODOS EXISTENTES PARA LA TOMA DE DECISIONES**

### **2.1 Antecedentes**

En un problema de toma de decisiones existen alternativas a considerar y evaluar mediante varios criterios, muchas veces conflictivos entre ellos. Hay alternativas que tienen un comportamiento excelente para algún criterio y malo en otro y hay alternativas que contribuyen con valores semejantes para un mismo criterio; en consecuencia es difícil adoptar una decisión. Por ese motivo se emplean modelos matemáticos que resultan entonces muy útiles para manejar esta complejidad, dado que no es posible representarla mediante una interpretación simplificada y porque la perspectiva analítica y reduccionista del modelado cuantitativo implica que la atención sólo se centra en algunas partes del problema (Sawaragi *et al*, 1992).

En este capítulo se comentan las diferentes técnicas matemáticas empleadas para la toma de decisiones y que conducen a la formulación y empleo de los distintos modelos matemáticos. Asimismo, se examinan los procedimientos que emplea cada uno para explicar su funcionamiento y los diversos mecanismos de cálculo.

Una pregunta que suele hacerse un centro decisor es cuál es el mejor modelo para aplicar a la resolución de un problema dado. Esta pregunta no tiene en realidad una respuesta concreta, dado que es necesario analizar el problema en profundidad y luego aplicar aquel modelo que mejor se adapte al mismo y que deberá ser apropiado para sus características (Warren, 2009).

Se analiza en este capítulo el procedimiento que sigue cada modelo. Ninguno de ellos está exento de críticas, tanto sea en el comportamiento en general como en el uso práctico para tratar problemas reales (Leyva López, 2004). No hay, por otro lado, ningún modelo mejor que otro (Romero, 1996), y tampoco existe un método simple que sea mejor que todos los otros métodos en todos los aspectos (Triantaphyllou, 2002).

Cada modelo tiene su campo de aplicación, sus ventajas y desventajas, que no se analizan aquí ya que no es el objeto de este trabajo. Se mencionan sí, aquellos elementos o factores que se estima contribuyen a obtener resultados a veces discutibles o que no convencen al centro decisor, ya sea porque no se ajustan a lo que un conjunto de expertos espera de una situación dada, o porque no satisface a las partes. Por otro lado son esos factores los que, sin lugar a dudas, ocasionan que dos modelos distintos, tratando el mismo problema, arrojen resultados completamente dispares, sino opuestos.

## 2.2 Necesidad de disponer de modelos matemáticos

Es evidentemente imposible que una persona pueda manejar toda la información disponible, interrelacionarla y llegar a una decisión correcta acerca de qué alternativa elegir. Los modelos matemáticos están contruidos para ordenar y procesar los datos y servir de guía al centro decisor tratando de representar lo más fielmente posible la situación real. Al respecto, Duckstein *et al* (1994), dicen que “*el propósito de aplicar los métodos de análisis de decisión con objetivos y criterios múltiples es ayudar al agente de la decisión y no el de reemplazarlo*”.

Hay que tener en cuenta sin embargo, que no todos los modelos se adaptan a todos los casos y que su elección puede afectar en forma significativa las decisiones basadas en juicios de valor, y que a menudo hay grandes diferencias de un modelo a otro en situaciones de decisión no comunes y que involucran criterios fuertes y contradictorios (Hobbs *et al*, 1997).

### 2.2.1 Familias de métodos

Hay cuatro familias principales a las que pertenecen estos métodos y que son:

1. Relaciones de superioridad o sobre clasificación (Outranking), a la cual pertenecen los métodos Electre y Promethee,
2. Relaciones de preferencia; métodos AHP y Maut,
3. Relaciones de distancia; método Topsis,
4. Relaciones lineales; Programación Lineal, Programación por Metas, Simplex Multicriterio.

Una amplia revisión de aplicaciones de diferentes métodos para la decisión multicriterio en su conjunto, se puede encontrar en Figueira *et al*, (2005) y en Vaidya *et al* (2006). Ver también tabla 6.4 en la Sección 6.4. Es también interesante observar la asociación de AHP con otros metodologías, ver por ejemplo Macharis *et al* (2004).

## 2.3 Método Electre (*Élimination Et Choix Traduisant la Réalité*)

Desarrollado por Roy (1968), Vincke (1992).

### 2.3.1 Fundamentos del método

El método se basa en la comparación de pares de alternativas con relación a cada criterio, y de acuerdo al siguiente principio:

*“Cuando una alternativa A es tan buena al menos como otra B en una mayoría de los criterios, y no hay ningún criterio en el que A sea notoriamente inferior a B, podemos afirmar sin riesgo que A supera a B”* (Barba-Romero, 1997).

Electre permite la incomparabilidad y no es compensatorio.

La comparabilidad se refiere a la posibilidad de contrastar o no elementos del problema. La incomparabilidad aparece cuando el centro decisor no tiene elementos que le

permitan comparar un concepto con otro por ser muy diferentes, como por ejemplo cuando debe comparar los objetos que le gustan con aquellos que le disgustan. (Korhonen, 2003).

Compensatorio a su vez se refiere a que un muy buen resultado en un criterio puede compensar los malos resultados de otro.

Los pasos a seguir de acuerdo al principio enunciado son los siguientes (Se ejemplifica sólo para el primer par):

*Primer paso:* Comienza con la construcción de la matriz de decisión en la cual los coeficientes pueden corresponder a criterios cuantitativos y cualitativos, y se asignan los correspondientes pesos a los criterios. Los criterios deben también estar afectados por la acción que persiguen, es decir maximizar o minimizar.

*Segundo paso:* Para analizar la primera parte del principio enunciado, se comienza entonces comparando el primer par de alternativas con respecto a la acción (Maximizar o Minimizar) indicada por el primer criterio. Si las correspondientes magnitudes de las alternativas consideradas cumplen la acción del criterio, entonces se le asigna a esa comparación el valor del peso del criterio. La suma de estos pesos, para este par de alternativas, cuando esta comparación se ha realizado para todos los criterios, suministra entonces el valor de superación (*Índice de concordancia*) de una alternativa sobre otra con respecto a los criterios, y permite construir una matriz llamada '*Matriz de concordancia*'.

*Tercer paso:* Para analizar la segunda parte del principio enunciado, se considera ahora, para el primer par y para criterio la diferencia cuantitativa entre las magnitudes.

*Cuarto paso:* Cuando se completa el análisis para el mismo primer par y para todos los criterios, se registra la mayor diferencia existente entre esas diferencias.

*Quinto paso:* Se calculan ahora, para el primer par y para cada criterio, las diferencias cuantitativas independientes de si se cumple o no la acción, Cuando se completa el análisis para el mismo primer par y para todos los criterios, se registra la mayor diferencia existente entre esas diferencias, es decir se obtiene la diferencia considerando todos los criterios.

*Sexto paso:* Se computa la ratio entre el valor calculado en el cuarto paso y el hallado en el quinto paso, lo cual indica la superación o no de una alternativa sobre otra desde el punto de vista de las cantidades (*Índice de discordancia*), lo cual permite construir la '*Matriz de discordancia*'.

*Séptimo paso:* El centro decisor establece un umbral de mínima para los valores de la matriz de concordancia y se anulan los valores que estén debajo del mismo. El resultado constituye la '*Matriz dominante de concordancia*'.

*Octavo paso:* El decisor establece un umbral de máxima para los valores de la matriz de discordancia y elimina los que estén por arriba del mismo. El resultado constituye la '*Matriz dominante de discordancia*'.

*Noveno paso:* Se comparan estas dos últimas matrices y se asigna un '1' en donde hay coincidencia de resultados, es decir cuando una alternativa dada obtiene superación en ambas matrices.

*Décimo paso:* Esto permite construir un grafo en donde puede apreciarse el ordenamiento resultante. El nodo que precede a los demás constituye el núcleo o kernel correspondiente a la solución.

Es de destacar que Electre permite conocer cuáles son las alternativas dominantes, pero no suministra la información referida a su ordenamiento. Triantaphyllou *et al* (1998) expresa este mismo aspecto diciendo que "*Dado que el sistema no es necesariamente completo, el método Electre a veces no es capaz de identificar la alternativa preferida. Sólo produce un núcleo de alternativas dominantes*".

Algunos investigadores aluden a uno de los aspectos más criticables de esta metodología en el sentido de que puede existir arbitrariedad en la fijación de los umbrales de concordancia y discordancia y en algunos casos puede prestarse a forzar la aparición cuando el kernel está vacío por medio de la modificación de dichos umbrales. Romero (1996) agrega que esto es crucial a la hora de evaluar este método para la toma de decisiones

### **2.3.2 Aplicaciones**

Se pueden encontrar en (Aragónes *et al*, 2001): (Fichefet *et al*, 1986), (Roy *et al*, 1986), (Barda *et al*, 1990). Además, en la tabla 6.4, Sección 6.4, Capítulo 6.

## **2.4 Método Promethee (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*)**

Desarrollado por Brans (1982), (Brans *et al*, 1982, 1984, 1985, 1986, 2004).

### **2.4.1 Fundamentos del método**

Está basado en una relación de superación en la cual se analiza la relación entre dos alternativas y se dice que una supera a la otra si se cumplen ciertas condiciones. Se consideran pares de alternativas y cada par se analiza en función de cada criterio. Si la relación cuantitativa de los valores de cada alternativa cumple con la acción, se establece una preferencia y cuyo valor, entre 0 y 1, está determinado por la aplicación de una función de transferencia. Para ello se establecen parámetros, en forma de umbrales de indiferencia y de preferencia. Si la diferencia entre los valores de dos alternativas y para un criterio dado está por debajo de un cierto umbral de indiferencia, se admite que esta diferencia no existe. El parámetro o umbral de preferencia se define como aquella diferencia mínima para que una alternativa se considere preferente a otra.

Por ejemplo, en un proyecto de construcción de caminos se establece la matriz de decisión de manera usual. Supóngase que haya tres alternativas 1, 2 y 3 entre los puntos

A y B y que están sujetas a varios criterios, uno de los cuales es el de '*Minimización de la distancia entre origen y destino*'.

*Primer paso:* Se comienza comparando el primer par de alternativas con respecto a la acción (Maximizar o Minimizar) indicada por el primer criterio. Si las correspondientes magnitudes de las alternativas consideradas cumplen la acción del criterio se continúa con el segundo paso,

*Segundo paso:* Se calcula la diferencia entre las magnitudes del primer par, y se la compara con un umbral fijado por el decisor (*Umbral de indiferencia*). Si la diferencia es menor que la establecida en el umbral, se considera que ambas alternativas son indiferentes. Si, en caso contrario, esta diferencia supera al umbral, se acepta que la respectiva alternativa es superior a la otra del par,

*Tercer paso:* Se asigna un valor a esa preferencia. Se lleva a cabo mediante funciones de transferencia que definen la forma de la relación y que también establece el centro decisor. De acuerdo a la función de transferencia elegida (hay seis tipos distintos) se aplica una cierta formulación,

*Cuarto paso:* El valor resultante del tercer paso se multiplica por el peso del criterio correspondiente,

*Quinto paso:* Una vez hallados los valores del primer par para todos los criterios, se suman estos valores,

*Sexto paso:* Se consideran todos los pares posibles,

*Séptimo paso:* Se construye una matriz cuadrada de alternativas y en donde se colocan los valores hallados para cada par de acuerdo al sexto paso,

*Octavo paso:* Se suman los valores de cada fila de la matriz obteniéndose los resultados para las alternativas dominantes,

*Noveno paso:* Se suman los valores de cada columna de la matriz obteniéndose los resultados de las alternativas dominadas,

*Décimo paso:* Para cada alternativa se resta el valor de su fila y el de su columna. La diferencia indica el valor final para cada alternativa,

*Décimo primer paso:* El ordenamiento está dado por los valores decrecientes hallados.

### 2.4.2 Operación

El modelo trabaja con un software comercial que facilita los cálculos.

#### *Pesos*

Como otros métodos de toma de decisiones a Promethee se le critica cierta subjetividad, ya que es el centro decisor el que establece los pesos asignados a cada criterio y las diferentes formas de las funciones de criterio, lo cual puede variar los resultados según el técnico que haga el estudio (Hidalgo, 2007).

#### *Ordenamiento*

Hay varias versiones de Promethee, por ejemplo Promethee I arroja una respuesta de orden parcial y que permite conocer qué alternativas son incomparables entre sí, lo que está oculto en la respuesta de Promethee II.

#### *Reversión de ordenamiento*

En Promethee existe el problema de reversión de ordenamientos (De Keyser *et al.*, 1996). Mareschal *et al* (2006, 2008) explican en qué circunstancias se produce tal fenómeno, específicamente en Promethee II, y demuestran que la reversión de ordenamiento es una consecuencia directa del principio de comparación pareada en el contexto de la decisión multicriterio, y cuál es su origen.

#### *Sensibilidad*

Los autores han desarrollado un modelo analítico que permite calcular los intervalos de estabilidad. El modelo está asociado a un sistema gráfico que muestra un plano denominado “GAIA” en donde se pueden apreciar en forma inmediata las consecuencias de cualquier modificación. Una interesante propiedad de este plano es que permite apreciar en forma visual las relaciones de conflicto que pueden existir entre criterios, como es por ejemplo si un criterio se refiere a la máxima producción de energía en una planta térmica, en tanto que otro busca la minimización de la contaminación atmosférica. Martínez *et al* (2005) expresan que este plano es muy conveniente cuando el decisor “*no tiene una clara idea de los pesos adecuados y desea explorar su espacio de libertad*”.

### 2.4.3 Aplicaciones

Promethee ha tenido muchas aplicaciones. Ver Behzadian *et al* (2010), y tabla 6.4, Sección 6.4, Capítulo 6. Algunos autores han propuesto el uso combinado con AHP consultar Macharis *et al* (2004).

## 2.5 Método AHP (*Analytic Hierarchy Process*)

Fue desarrollado por Saaty (1977, 1980).

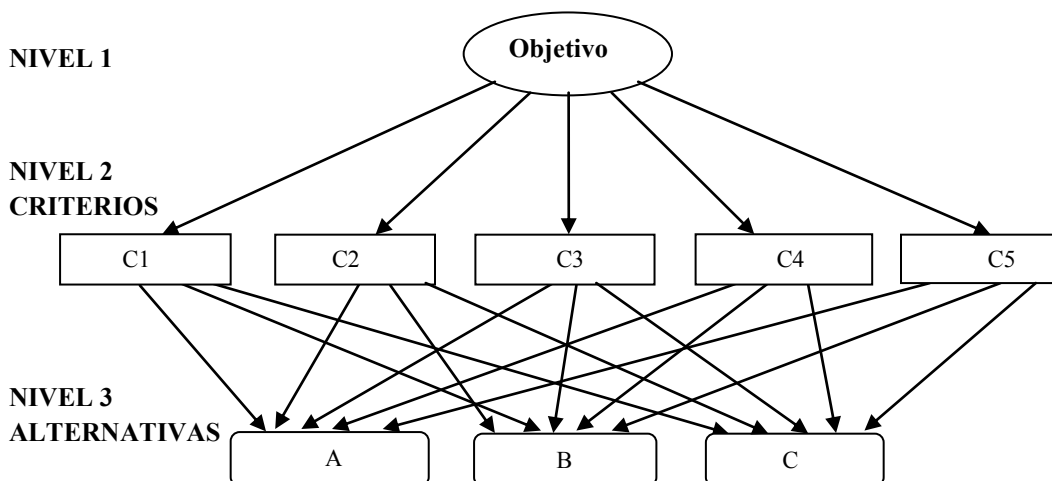
### 2.5.1 Fundamentos del método

Es un método que se basa en descomponer jerárquicamente el problema a tratar en sus elementos componentes. En el más alto nivel de la jerarquía se ubica entonces el objetivo a alcanzar. El segundo nivel está constituido por los subobjetivos y criterios

que permitirán evaluar el grado de logro de los mismos por las diferentes alternativas, que están en un tercer nivel. Un ejemplo de esta jerarquización se muestra en la figura 2.1 Ha tenido y tiene una gran aceptación; se emplea en muy diversos tipos de proyectos y es quizás hoy en día el modelo más usado. Se caracteriza por su sencillez aunque también por la carga de trabajo necesaria para establecer las comparaciones.

### 2.52 Mecánica y etapas del método

La figura 2.1 ejemplifica el mecanismo de descomposición.



**Figura 2.1 Descomposición jerárquica de un problema**

#### 2.5.2.1 Determinación de pesos de los criterios

El AHP trabaja en una primera etapa estableciendo comparaciones entre dos criterios y el objetivo, y en una segunda etapa comparando entre sí un par de alternativas con respecto a un criterio dado. La primera precede a las segunda. Los siguientes párrafos aclaran estas dos etapas.

Primera etapa: Ponderación de los criterios

*Primer paso:* Se comparan los criterios del nivel 2 con respecto a la consecución del objetivo, estableciendo comparaciones pareadas entre los criterios de un mismo nivel que el centro decisor analiza sobre la base de una escala de comparación 1-9 establecida por el autor (Escala de Saaty).

Así, se comparan los criterios C1 y C2 sobre la base del objetivo mediante la formulación de la siguiente pregunta: *¿Con respecto al objetivo, cuál es más importante, el criterio C1 o el C2?*

La respuesta a esta pregunta se materializa mediante el empleo de una escala de ratios, llamada *‘Escala de Saaty’* (1980), basada, según su autor, en una teoría de psicología cognitiva que postula la máxima cantidad de comparaciones que el ser humano puede realizar. La escala abarca desde el 1 al 9, con valores intermedios cuando hay dudas entre dos juicios de valor.

Volviendo a la pregunta formulada como ejemplo, el decisor puede contestar que el criterio C2 es '*Moderadamente más importante que C1*', es decir, expresa una preferencia, y la cuantifica usando la escala de ratios mencionada más arriba, y concluye asignando a C2 un cierto valor y a C1 su inverso.

*Segundo paso:* Cuando esta comparación se realiza para todo los pares de criterios, queda conformada una matriz recíproca.

*Tercer paso:* El próximo paso consiste en derivar prioridades para los criterios usando la técnica del auto valor. Con la obtención de este vector de pesos finaliza la primera etapa, que ha consistido entonces en asignar pesos a los criterios.

#### 2.5.2.2 Valoración de alternativas

En la segunda etapa se realiza un procedimiento similar de comparación pareada, pero ahora se analiza cada par de alternativas en función de cada criterio.

*Primer paso:* Como ejemplo, si se analiza el par A y B de alternativas, una pregunta podría ser; *¿Considerando el criterio C1, que alternativa es preferida, la A o la B?*

El centro decisor puede contestar: '*La alternativa B es más importante que la A*' Por consiguiente le asigna un cierto valor a la alternativa B, y un valor inverso a la alternativa A, basado en la escala de ratios.

*Segundo paso:* Aplicando el auto valor a esta matriz recíproca se obtienen los pesos de las alternativas con respecto al criterio C1.

*Tercer paso:* Consiste en multiplicar cada uno de los valores obtenidos por el peso hallado en el tercer paso de la primera etapa y correspondiente al criterio C1.

*Cuarto paso:* Se repite este procedimiento para cada uno de los tres criterios restantes.

*Quinto paso:* Se suman para cada alternativa los valores obtenidos con cada criterio. El conjunto de resultados permite ordenar las alternativas.

#### 2.5.3 Aplicaciones

Este método se ha utilizado en numerosos casos, y es una de las técnicas más usadas actualmente con muy variadas aplicaciones y grados de complejidad. Se ha empleado también combinado con otros modelos de decisión y con lógica difusa. Una aplicación muy útil del método AHP es que posibilita determinar los coeficientes de la matriz de decisión cuando no se conocen estos valores, ya sea por falta de datos o por incertidumbre, dado que permite determinarlos sobre la base de las preferencias del centro decisor y en función de los criterios. Por este motivo en muchas oportunidades se integra este método con otros, que trabajan entonces como punto de partida con los valores hallados por AHP.



#### **2.5.4 Método ANP (*The Analytic Network Process for Decision Making with Dependence and Feedback*)**

Esta herramienta ha sido también desarrollada por Saaty (2003); es una generalización del método AHP, y trabaja con dependencias y retroalimentación. El modelo, que opera bajo los mismos principios del AHP, hace posible una interacción y retroalimentación dentro de clústers de criterios y de alternativas y entre los mismos, lo cual permite desarrollar un modelo matemático que replica con mayor exactitud que el AHP escenarios reales donde juegan intrincadas y complejas relaciones. ANP trabaja con clústers o conjunto de elementos en lugar de que estos elementos estén agrupados en niveles, y su resolución se simplifica gracias al empleo de un software.

Las prioridades derivadas de las comparaciones pareadas se introducen en una matriz no ponderada (unweighted matrix). Posteriormente, los valores de esta matriz se multiplican por el peso de los clústers y se obtiene la súper matriz ponderada (weighted matrix). Finalmente elevando esta matriz a potencias sucesivas se alcanza un límite en el cual concluye el cálculo y que contiene los resultados finales. Esta última matriz se denomina matriz límite (limit matrix).

La gran ventaja de este procedimiento de elevación a potencias es que se tienen en cuenta todas las relaciones directas e indirectas entre los distintos elementos.

#### **2.6 Método Multi-attribute Utility Theory (MAUT)**

Su nombre proviene de determinar funciones de utilidad<sup>2</sup> con el objeto de transformar los coeficientes  $a_{ij}$  de las alternativas (magnitud preferencial) a una escala común y que es adimensional. Fue desarrollado por Keeney and Raiffa in 1976 (Keeney *et al*, 1976).

Ha sido uno de los primeros métodos desarrollados para tratar el problema de decisión; requiere la construcción parcial de funciones de utilidad y su posterior agregación en una función de utilidad general por adición o multiplicación (Kenney *et al*, 1993).

Se parte de una matriz de decisión con alternativas y criterios, y el método consiste en determinar para cada alternativa u opción, una función de utilidad que indica en qué forma se agregan los valores resultantes para cada criterio ponderado. En el caso más simple, el valor de una alternativa esta dado por la ecuación (2.1).

$$x_j = \sum_{i=1}^m w_i \cdot a_{ij} \quad j = 1, \dots, n. \quad (2.1)$$

siendo:

$x_j$ : Valor de la alternativa  $j$ ,

$w_i$ : Peso del criterio  $i$ ,

$a_{ij}$ : Magnitud preferencial

---

<sup>2</sup> En Economía se define como 'utilidad' al grado de satisfacción que produce un bien.

En casos más complicados, hay un método para determinar los pesos a asignar a los criterios, propuesto por Edwards (1977), que consiste en clasificar los criterios desde el menos importante al más importante, asignando al primero el valor 10 y valores más elevados en orden de importancia. Los pesos finales se obtienen mediante normalización de estos valores. A continuación se asignan probabilidades a las alternativas para cada criterio. La utilidad correspondiente a cada alternativa se obtiene como producto de esta probabilidad por el peso del correspondiente criterio. La suma de estos productos para cada alternativa suministra su valor de la utilidad, lo cual permite ordenarlas.

## **2.7 Método de Programación Lineal (PL)**

La Programación Lineal es una técnica que trata de la resolución de problemas de carácter lineal, en donde se trata de optimizar, ya sea maximizando o minimizando una función lineal, llamada '*objetivo*' y que está sujeta a una serie de restricciones representadas por inequaciones lineales y cuyas variables, que representan las incógnitas del problema, sólo puede tener valores positivos.

### **2.7.1 Breve historia de la técnica**

Fue desarrollada por Leonid Kantoróvich, (1959) para la asignación óptima de recursos en una economía, trabajo por el cual obtuvo el Premio Nobel de Economía en 1975 conjuntamente con Tjalling Koopmans. En 1947, George Dantzig (Dantzig, 1948), creó un algoritmo que denominó '*Simplex*' para la resolución de problemas logísticos mediante PL, y que desde entonces es el método por antonomasia de la PL, y está considerado como una de las más importantes contribuciones matemáticas y que mayor influencia ha tenido en el siglo XX.

A mediados de la década de 1980 aparecieron los primeros programas computacionales para resolver problemas de ecuaciones lineales en PC, aplicando el Simplex, y al día de hoy hay numerosos programas para ello.

### **2.7.2 Fundamentos de la Programación Lineal**

Dado que el procedimiento Simus está basado en la PL, es conveniente, antes de describirlo y analizarlo, realizar una breve introducción a esta técnica para tener una idea de su estructura básica, la cual tiene tres elementos característicos que son:

- La función objetivo ( $Z$ ), es decir, el propósito o fin que se desea alcanzar. Está expresada por una ecuación lineal que incluye las alternativas representadas como incógnitas, y los coeficientes que las afectan. La típica función objetivo en PL contiene un solo objetivo (problema monoobjetivo), e indica además si la acción es de maximizar o minimizar. Es una función indefinida ya que no cuantifica el alcance. Así, se dice por ejemplo, '*Maximizar la producción industrial*', '*Minimizar el coste ecológico*', o '*Igualar el monto asignado*'. Un ejemplo de una función objetivo es:

***Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples***

$$Z = 8x_1 + 7,6x_2 + 5x_3 + 2x_4 \text{ (Maximizar) (Por ejemplo, la producción industrial)}$$

Las  $x_j$  representan a las diversas alternativas discretas cuyo valor, y en consecuencia su ordenamiento, se quiere establecer. Los coeficientes que afectan a esas variables se determinan de acuerdo al tipo de problema; por ejemplo, si nos estamos refiriendo a beneficios, cada coeficiente indica el beneficio asociado a cada unidad de las alternativas. Cuando la función objetivo incorpora varios objetivos, el problema se transforma en multiobjetivo y en ese caso hay diversos valores de  $Z$ , por ejemplo, para tres objetivos:

$$Z = 8x_1 + 7,6x_2 + 5x_3 + 2x_4 \text{ (Maximizar)} \\ \text{(La producción industrial)}$$

$$Z' = 0,5x_1 + 1,02x_2 + 0,75x_3 + 0,38x_4 \text{ (Minimizar)} \\ \text{(El coste ecológico)}$$

$$Z'' = 8x_1 + 7,6x_2 + 5x_3 + 2x_4 \text{ (Maximizar)} \\ \text{(El ingreso per cápita)}$$

Aunque la PL clásica es monoobjetivo, se han hecho esfuerzos para tratar de utilizarla en múltiples objetivos. El presente trabajo, es uno de esos esfuerzos, aunque en este caso la solución hallada no es óptima sino satisfaciente.

- La matriz de decisión se ilustra en la tabla 2.1 y está formada por:
  - Matriz de elementos o coeficientes ' $a_{ij}$ ' que indican la participación de cada alternativa para cumplimentar cada criterio. En columnas se indican las alternativas ' $A_j$ ' en tanto que en filas están los criterios ' $C_i$ '.

**Tabla 2.1 Elementos constitutivos de la matriz de decisión**

ALTERNATIVAS									
<div><div>A<sub>1</sub>    ....    A<sub>j</sub>    ....    A<sub>m</sub></div></div>						Operador	Término independiente	Acción	
CRITERIOS									
C <sub>i</sub>	a <sub>i1</sub>	....	a <sub>ij</sub>	....	a <sub>im</sub>	≥	b <sub>i</sub>	(Minimizar)	
....	....		....		....	....	....	....	
....	....		....		....	....	....	....	
C <sub>k</sub>	a <sub>k1</sub>	....	a <sub>kj</sub>	....	a <sub>km</sub>	≥	b <sub>k</sub>	(Minimizar)	
....	....		....		....	....	....	....	
....	....		....		....	....	....	....	
C <sub>l</sub>	a <sub>l1</sub>	....	a <sub>lj</sub>	....	a <sub>lm</sub>	≤	b <sub>l</sub>	(Maximizar)	
....	....		....		....	....	....	....	
....	....		....		....	....	....	....	
C <sub>n</sub>	a <sub>ni</sub>	....	a <sub>nj</sub>	....	a <sub>nm</sub>	=	b <sub>n</sub>	(Igual a...)	

Donde:

$$\begin{array}{ll} A = \text{Alternativas} & A_j \quad j = \{1 \text{-----} m\} \\ C = \text{Criterios} & C_i \quad i = \{1 \text{-----} n\} \end{array}$$

- Acción a realizar, indicada mediante los operadores ' $\geq$ ', ' $\leq$ ', ' $=$ '.
- Vector (B) que indica los términos independientes ' $b_i$ ' para cada criterio.

Como se aprecia, cada criterio tiene la forma de una inecuación lineal y está sujeto a una acción que puede ser '*Maximizar*', '*Minimizar*' o '*Igualar*'. En PL los criterios  $C_i$  deben ser cuantitativos.

Cada una de las inecuaciones de la tabla 2.1 puede expresarse de la siguiente manera, por ejemplo tomando el criterio C2.

$$a_{21} \cdot A_1 \quad a_{22} \cdot A_2 \quad a_{23} \cdot A_3 \geq b_2 \quad (2.2)$$

en donde  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  son las alternativas y  $a_{ij}$  los coeficientes que las multiplican. Si esta formulación se repite para todas las filas queda formado un sistema de inecuaciones, que es la base del método de PL.

- Los términos independientes ' $b_i$ ' que pertenecen al vector B, son los límites impuestos a cada criterio. Estos pueden ser valores en unidades tales como  $m^3$ , km, %, Euros, número, etc., naturalmente, en consonancia con las unidades de los coeficientes de las respectivas filas. Debido a que los criterios pueden abarcar infinidad de situaciones económicas, sociales, ambientales, de capacidad, etc., el conjunto de las filas puede mostrar una gran variedad de unidades de medida.

El problema consiste entonces en optimizar una función objetivo sujeta a todas las restricciones impuestas por los criterios.

#### *Resolución del sistema*

Matricialmente, este sistema de inecuaciones se expresa según la ecuación matricial (2.3).

$$A \times X = B \quad (2.3)$$

En donde:

A: Es la matriz compuesta por el conjunto de coeficientes  $a_{ij}$ .

X: Es el vector de las alternativas

B: Es el vector de los términos independientes

La PL trabaja en múltiples dimensiones (tantas como n-variables o alternativas haya), y en donde no hay límite para la cantidad de variables a considerar. Los criterios, tantos como se deseen, constituyen hiperplanos en el espacio n-dimensional. Estos hiperplanos definen un politopo dentro del cual se encuentra el conjunto de todas las soluciones factibles al problema dado; sin embargo, las que interesan son las soluciones eficientes

que forman parte de este conjunto, y que se encuentran en los vértices del politopo. La solución óptima es aquella que pertenece a la tangencia entre la función objetivo y uno de estos vértices. Esta solución óptima - si existe - se alcanza empleando el algoritmo del Simplex.

Este algoritmo, en esencia, trabaja mediante iteraciones; para cada una encuentra un punto eficiente del politopo, entonces avanza sobre su frontera para encontrar una solución mejor, y se detiene cuando llega al vértice que corresponde al óptimo o solución óptima. Para ello, en cada interacción computa el vector  $X$  - que caracteriza a cada vértice eficiente - mediante la inversión de la matriz, de acuerdo a la fórmula (2.4):

$$X = B \times A^{-1} \quad (2.4)$$

Para verificar si hay una mejor solución, compara en cada iteración y para cada alternativa la diferencia entre el valor del funcional (considerando los valores recientemente hallados) y el respectivo coeficiente asignado originariamente a la función objetivo para esa alternativa, es decir  $(Z_j - C_j)$ . Este procedimiento se repite hasta encontrar el punto de óptimo (si es que existe).

Hay numerosos programas computacionales que desarrollan el Simplex y naturalmente, cualquiera de ellos puede aplicarse para resolver este problema. En esta tesis, el problema se plantea en una planilla de cálculo Excel y se resuelve mediante el empleo del programa 'Solver' que está incorporado a Excel. Los datos se cargan en Excel, el Solver los toma, los procesa de acuerdo al algoritmo del Simplex, y devuelve la solución a la planilla de cálculo.

Los coeficientes  $a_{ij}$  se determinan de diversas maneras, ya sea por valores cuantitativos, como '*Capacidad de producción*' o con valores cualitativos derivados, por ejemplo, de preferencias que representan las valoraciones que el centro decisor asigna a las alternativas, respecto a cada criterio.

### ***2.7.3 Metodología de la PL aplicada la resolución problemas de decisión***

Esta comienza con la obtención de los distintos elementos que la componen y que son:

- *Objetivos*: Los fija el promotor del proyecto, el centro decisor y/o las partes interesadas, y lógicamente dependen de la naturaleza del proyecto. Así, hay objetivos de maximización de beneficios, de minimización de costos, de minimización de riesgos, de maximización de una producción, de maximización del bienestar, de minimización de daños ambientales, de igualar fondos disponibles, etc.

Los objetivos son expresiones indefinidas en el sentido de no establecer logros cuantitativos: un objetivo del problema puede ser '*Minimizar el impacto ambiental*', o '*Maximizar el beneficio económico*'. En PL el objetivo es una función lineal de las alternativas.

- *Proyectos o alternativas de un proyecto*: Dependen del tipo de problema y normalmente se trata de un número discreto. Pueden ser unas pocas o cientos. Por ejemplo, en un proyecto de localización industrial, las alternativas u opciones son los sitios o lugares que presentan las características adecuadas para la industria de que se trate, ya sea porque son puertos, porque son ciudades conectadas a una amplia red de transporte, por la existencia de mano de obra calificada, por beneficios impositivos, por la existencia de proveedores, etc.

- *Criterios*: Son restricciones en forma de inecuaciones lineales que se emplean para evaluar las alternativas y están orientados a la consecución del objetivo u objetivos deseados. Pueden ser cuantitativos, cuando expresan relaciones tangibles como por ejemplo '*Capacidad de transporte de barcos portacontenedores*', '*Longitud en km de un gasoducto entre dos puntos A y B*', '*Fondos totales disponibles*', etc.

Son cualitativos cuando se refieren a preferencias y en general con incertidumbre. Por ejemplo '*Riesgo aceptado en la demora en la ejecución de un proyecto*', '*Posibilidad de encontrar condiciones adversas en el transporte por tierra de grandes equipos*', '*Reacción de la población con respecto a un proyecto*', etc.

A pesar de tener la misma naturaleza que los objetivos, ya que ambos son funciones lineales de las mismas variables, los criterios constituyen los pasos o metas para alcanzar el objetivo, y están acotados en su accionar por valores límites, que corresponden a los términos de la derecha de cada inecuación.

- *Coeficientes*: Son las magnitudes que indican la participación de cada alternativa para cada criterio. Por ejemplo, si el criterio se refiere a la '*Potencia instalada*', cada coeficiente suele indicar la potencia que puede generar cada alternativa de producción eléctrica. Si el criterio es cualitativo, como por ejemplo '*Beneficios ambientales para la población*', el coeficiente será una magnitud que de alguna manera refleje la correspondiente participación en la obtención de esos beneficios. Hay varias formas de obtener estos coeficientes, ya sea por una apreciación entre 1 y 10 por ejemplo (o en cualquier otro intervalo), y que traduzcan apreciaciones subjetivas en valores cuantitativos, o bien pueden emplearse técnicas como AHP (Saaty, 1980).

- *Términos independientes, límites, términos de la derecha*: Constituyen una característica esencial de la PL y son valores cuantitativos que limitan el alcance de los criterios. Pueden estar expresados en cualquier tipo de unidades y ser fracciones decimales o números enteros. Se introducen límites de mínima, tal como los que establecen la cantidad mínima de agua que un municipio debe suministrar diariamente a cada persona del mismo. O pueden ser de máxima, como por ejemplo, el contenido máximo admisible de SOx procedente de una planta eléctrica que quema combustibles fósiles. O también referirse a intervalos, tal como el establecido por los límites entre los cuales pueden variar los metros cuadrados por persona en un proyecto de construcción de viviendas. Los hay referidos al tiempo, como los que establecen límites para que una ambulancia responda a un pedido, etc.

#### **2.7.4 Modelado de una situación real**

El problema se modela en una planilla de Excel, es decir se establece la matriz de decisión que consiste en los siguientes pasos:

*Primer paso:* Se colocan en columnas las alternativas y en filas los criterios de selección, que constituyen las restricciones del problema,

*Segundo paso:* En las intersecciones de las columnas con las filas se colocan los coeficientes de las alternativas, o sea los valores con que cada alternativa contribuye al propósito de cada meta o criterio,

*Tercer paso:* Se indica el sentido de la acción para cada meta mediante los correspondientes operadores, o sea ( $\leq$ ), (acción de maximizar), ( $\geq$ ) (acción de minimizar) o ( $=$ ) (acción de igualar). Queda entonces formado un sistema de inecuaciones,

*Cuarto paso:* Se definen los límites para cada meta en una columna del lado derecho del sistema de inecuaciones,

*Quinto paso:* Se plantea el objetivo en forma lineal es decir en función de las alternativas del problema,

*Sexto paso:* Se ejecuta el algoritmo del Simplex mediante cualquier programa adecuado,

*Séptimo paso:* El resultado, o sea los valores correspondientes a cada alternativa se registrará en la fila de Excel que haya elegido el usuario. De aquí, se deduce el ordenamiento de alternativas.

Cada vez que se resuelve un problema de este tipo (*problema primal*), se genera su 'problema espejo' que es el '*problema dual*'. Los valores de la incógnitas del dual corresponden a las restricciones del primal y su interpretación es que son valores marginales de éstas. En consecuencia, su conocimiento permite determinar como cambia o se modifica el valor de la función objetivo para variaciones unitarias de los criterios. Esta muy importante característica de la PL permite realizar un profundo análisis de sensibilidad.

#### **2.7.5 Aplicaciones**

Son innumerables las aplicaciones de la PL y en campos tan disímiles como producción, finanzas, cuencas hídricas, localización industrial, etc. Dutta *et al* (2001), citan aplicaciones por rubros tales como la industria siderurgia, optimización de la producción, mezclas de productos, programación, inventario y distribución, y almacenamiento. Véase también tabla 6.4 en la sección 6.4, Capítulo 6. Yi-Chun

(2008), refiriéndose a la PL, manifiesta que “*Today (LP) is a standard tool used by some companies (around 56%) of even moderate size*”.

#### **2.7.6 Fundamentos de la Programación por Metas (Goal Programming)**

Este método fue desarrollado por Charnes y Cooper (1961), y probablemente constituyó el primer intento en resolver por PL problemas con múltiples objetivos. Es una extensión de la PL, sin embargo no aspira como ésta a alcanzar una solución óptima, sino una solución lógica satisfaciente (Romero, 1996).

Este método ha sido explicado y aplicado en numerosas actividades. Para su discusión y ejemplos consultar Ignizio *et al* (1994), (Jones *et al*, 2010) (Romero, 1991, 1996).

Su aplicación consta de los siguientes pasos:

*Primer paso:* Fijar los diferentes objetivos del problema y sus restricciones,

*Segundo paso:* Introducir en cada uno variables de desviación positivas y negativas. Las primeras expresan en cuánto se permite que se exceda el valor de aspiración del objetivo, en tanto que las segundas indican en cuánto se permite que dicho valor no llegue a cumplirse,

*Tercer paso:* Planteamiento de la matriz de decisión,

*Cuarto paso:* Aplicar programación lineal o no lineal según el caso para resolver el problema, y cuyo objetivo es la minimización de las desviaciones.

Esta minimización puede efectuarse de distintas maneras, por ejemplo, se determina una función objetivo única que contenga todas las desviaciones. Existe también el sistema de metas lexicográficas y en el cual se asignan valores de importancia o prioridades a los diferentes objetivos. Para una explicación accesible de estos procedimientos, consultar Romero (1996).

Según este investigador, una gran ventaja de la programación por metas es que permite combinar la lógica de la optimización con los deseos del centro decisor.

#### **2.7.7 Método Simplex multiobjetivo**

Como su nombre lo indica, aplica el método Simplex para resolver problemas con múltiples objetivos. Para ello se emplea una matriz de decisión o cuadro del Simplex, en donde se agregan filas adicionales por encima y por debajo de la matriz de decisión. Las inferiores corresponden a los diferentes objetivos en tanto que las superiores pertenecen a los coeficientes de esos mismos objetivos. En general se utiliza el algoritmo de Zeleny (1974).

Una explicación accesible de esta metodología se ilustra con un ejemplo en Zavala *et al* (2007).



## **2.8 Método Topsis (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Situation*)**

Desarrollado por Hwang *et al* (1981).

### **2.8.1 Fundamentos del método**

Pertenece a la categoría de los métodos que buscan la menor distancia a una solución ideal. Este modelo se destaca por su sencillez y por la transparencia del procedimiento. Está basado en la premisa de que es racional elegir un resultado que esté lo más cerca posible de una situación ideal y lo más lejos posible de la anti ideal (Zeleny, 2000).

Parte de la base de considerar una solución ideal a un problema, es decir aquella que corresponde a los mejores valores de los coeficientes de las alternativas para cada criterio y determina entonces un '*punto ideal positivo*', y la '*solución ideal positiva*' sería entonces aquella que incorporara las correspondientes alternativas. Determina también, de manera similar, cuales son los peores valores y encuentra un punto '*ideal negativo*'. Entonces la '*solución ideal negativa*' sería aquella que incorporara las correspondientes alternativas.

Lo que se persigue es que una alternativa esté lo más cerca posible del ideal positivo y lo más lejos posible del ideal negativo. Sin embargo, si hay dos alternativas, A y B por ejemplo, la A puede estar más cerca del punto ideal positivo que la B y ser entonces la preferida, pero la B puede hallarse a mayor distancia del ideal negativo que la A y sería en consecuencia la mejor, quedando entonces la dificultad de cual elegir.

Para ello se calcula un '*índice de similitud*', que "*combina la proximidad a la solución ideal positiva con la lejanía respecto a la solución ideal negativa, y que tiende entonces a maximizarla distancia relativa al ideal negativo respecto a la suma de las distancia positivas y negativas*" (Alberto *et al*, 2004).

El cálculo de las distancias '*L*' a cada solución ideal se lleva a cabo por una fórmula sencilla y afectada de un exponente (*métrica 'p'*), que corresponde a la Distancia Euclidiana ( $p=2$ ). Es decir, lo que se busca es una solución eficiente y de compromiso entre las soluciones factibles.

Si los pesos  $w_i$  son iguales, y la métrica es igual a '*1*', entonces  $p = 1$  y se generan líneas rectas de isoutilidad. Si los pesos  $w_i$  son iguales, y la métrica es igual a 2, las líneas de isoutilidad son curvas. En un problema de dos dimensiones y dos objetivos, la solución se encuentra en la tangencia de las curvas de isocoste con el polígono de las soluciones (Jaramillo, 2002).

Una metodología similar la '*Programación Compromiso*' también busca una solución de equilibrio que se logra con  $L_\infty$ , que es algo muy atractivo para la selección (Romero, 1996a), en cambio para  $L_1$  la solución puede estar fuertemente desequilibrada.

### 2.8.2 Aplicaciones

Existen muchas aplicaciones de Topsis muy especialmente en relación con lógica difusa. Ver Figueira *et al* (2005) y tabla 6.4, Sección 6.4, Capítulo 6.

## 2.9 Comparación de resultados alcanzados por los distintos modelos en un caso específico

Es evidentemente difícil contrastar resultados de los distintos métodos debido a sus diferentes características, y es probable que la dificultad estribe en encontrar un parámetro común de comparación. Surge entonces como alternativa razonable, pensar que una disyuntiva podría ser resolver un mismo problema por diferentes métodos y examinar los resultados, y eso es lo que han llevado a cabo varios investigadores. Así, Wolfslehner (2002), describe un caso real en donde se comparan 4 alternativas empleando 8 criterios y resolviendo el problema con los siguientes métodos: Smart - AHP – ANP – Promethee I/II y Electre III. A fin de comprobar en forma heurística la hipótesis planteada de que en esencia todos los métodos deben arrojar resultados equivalente cuando se aplican a la resolución de un mismo problema, a continuación se analiza un caso real que fue resuelto usando el modelo Regime conjuntamente con AHP. El mismo problema, con 4 alternativas y 20 criterios ha sido resuelto por ANP, Simus, Promethee y Topsis y se han comparado los resultados obtenidos.

### 2.9.1 Estudio comparativo de un caso: Revalorización del aeropuerto de Maastricht

El proyecto se refiere a una reevaluación del aeropuerto de Maastricht, en Holanda, un trabajo llevado a cabo por Vreeker *et al.* (2001), y titulado '*A multicriteria decision support methodology for evaluating airport expansion plans*'

El resultado de la comparación se muestra en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Resultados de los distintos modelos para el aeropuerto de Maastricht**

	ALTERNATIVAS				Fuente
	A	B	C	D	
<b>MODELOS</b>					
<b>Regime/AHP/Flag</b>	<b>0,34</b>	<b>0,94</b>	<b>0,61</b>	<b>0,11</b>	Vreeker <i>et al</i> (2001)
<b>AHP</b>	<b>0,07</b>	<b>0,18</b>	<b>0,15</b>	<b>0,09</b>	García <i>et al</i> (2009)
<b>ANP</b>	<b>0,05</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>	<b>0,06</b>	García <i>et al</i> (2009)
<b>Promethee</b>	<b>-0,25</b>	<b>0,19</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	García <i>et al</i> (2009)
<b>Topsis</b>	<b>0,57</b>	<b>0,73</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>	Munier (2011)

Los correspondientes ordenamientos se muestran en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Ordenamientos de acuerdo a cada modelo**

MODELOS	ORDENAMIENTOS
<b>Regime/AHP/Flag</b>	<b>B – C – A - D</b>
<b>AHP</b>	<b>B – C – D - A</b>
<b>ANP</b>	<b>B – C – D - A</b>

***Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples***

<b>Promethee</b>	<b>B – C - A</b>
<b>Topsis</b>	<b>B – A – D - C</b>

Como se aprecia, es elevada la similitud de resultados a pesar de emplear cinco modelos distintos y, si bien un ejemplo no es suficiente para comprobar una hipótesis, es evidente que tanto la lógica como el desarrollo práctico tienden a indicar que existe una equivalencia de resultados, especialmente cuando se piensa que pueden existir, como en este caso, un total de  $4! = 24$  ordenamientos distintos.

### ***2.9.2 Resumen sobre las dificultades encontradas***

Como resumen de este tema, es indudable que todos los modelos tienen sus pros y sus contras, pero lo que resulta evidente es que hay proyectos para los cuales conviene emplear un determinado modelo. Lógicamente, esto provoca como consecuencia, una tarea adicional para el centro decisor, quien debe inclinarse por uno u otro método.

Entendemos que los factores que ocasionan distorsión en estos modelos no son los procedimientos en sí, sino que responden a las diversas formas de tratar la información, y esto afecta a todos ellos, incluyendo la PL y Simus. Por otro lado, es de hacer notar que no todas las imperfecciones, son atribuibles a los modelos, ya que muchas de ellas comienzan con la forma en que se obtienen los datos y la selección de los criterios.

En muchos casos las dificultades responden a la necesidad de completar datos, o a situaciones sobre las que no hay antecedentes, o porque no se conocen con exactitud los factores que influyen sobre el problema, pero en muchos otros surgen como consecuencia de la opinión o preferencia del centro decisor y sus colaboradores, o de lo que desea el promotor del proyecto. Es probablemente ilusorio pretender un sistema que elimine las subjetividades, que son inherentes a todo proyecto, pero sí se entiende que pueden reducirse, sobretodo acotando las apreciaciones personales y preferenciales, y se entiende que la PL y el procedimiento Simus puede aportar soluciones para disminuirlas.

### **2.10 Comparación entre modelos**

Referente a esta comparación una revisión de la literatura muestra que ésta es muy escasa, y la que existe se limita a contrastaciones parciales entre modelos y para un caso dado. En el proyecto *Pittsburg Area Transportation Project (1999)*, se corrobora esta afirmación cuando se expresa que "*....Sin embargo, a pesar de que existe un alto grado de investigación sobre los modelos, no hay abundante literatura sobre su comparabilidad*". Por otro lado hay investigadores que manifiestan que la comparabilidad carece de sentido, ya que se emplean modelos distintos y que trabajan con distintos procedimientos.

Estimamos que esta comparabilidad es posible y deseable, y que si, hipotéticamente se conocieran los valores reales en un caso dado, con respecto a pesos, niveles, funciones de transferencia, escalas, etc., todos los modelos deberían coincidir en sus resultados. Hay naturalmente subjetividad, inherente al proceso de decisión, pero ésta es la misma para todos los modelos ya que se habla de un mismo centro decisor. En realidad, lo que se está modelando son sus preferencias y lo que varía es la forma de tratar esas preferencias porque se manejan distintas escalas y diferentes formas de agregar y medir la preferencia del centro decisor. Por ejemplo a pesar de su similitud, el método Maut y el AHP emplean escalas diferentes, el primero usa escalas de intervalos en tanto que el segundo utiliza escalas ratio. En forma similar, y si se consideran Electre y Promethee la diferencia radica en que la preferencia se mide considerando la fuerza de los criterios a favor utilizando los pesos, lo que puede ocasionar discrepancias en los resultados, influyendo asimismo si se considera compensación o no.

Esta comparabilidad e igualdad de resultados es también postulada por Martínez (2005) cuando dice, al finalizar un estudio comparativo entre los modelos AHP y Promethee, que *“Podemos concluir que si existe una solución clara, sea cuál sea el método que se tome, probablemente se llegará a dicha solución.* Por su lado Triantaphyllou (1998), basado en sus experiencias apunta que *“La mejor alternativa es la misma independientemente del modelo elegido”.*

## CAPÍTULO 3

## EL PROCEDIMIENTO SIMUS

*(Sequential Interactive Model for Urban Systems)*

### 3.1 Fundamentos de Simus

El método Simus es un procedimiento heurístico basado en la PL que permite trabajar tanto con criterios cuantitativos como cualitativos y que, además, es capaz de manejar problemas con objetivos múltiples. A diferencia de la PL, no produce resultados óptimos sino soluciones satisfactorias, al igual que los modelos existentes.

#### 3.1.1 Análisis del problema y relación con otras técnicas afines

Considerando Simus con relación a otros métodos, existen técnicas consagradas que persiguen resultados afines, pero no iguales a los de la PL, tales como el '*Clúster Analysis*', el '*Significance Analysis*' y el '*Metodo DPSIR*', por lo tanto se considera que resuelven problemas de distinta índole y que por lo tanto no constituyen técnicas alternativas para resolver un problema de toma de decisiones.

Por ejemplo el '*Cluster Analysis*' o 'Análisis de Grupos', se emplea para agrupar datos y que estén relacionados, sean significativos y útiles, y puede usarse para clasificar la información a suministrar al modelo de PL, pero esta técnica no está diseñada para ordenar un conjunto de datos de acuerdo a su cumplimiento de restricciones y en función de un objetivo, como lo hace la PL.

El '*Significance Analysis*' o '*Análisis de Importancia*' es una técnica estadística para determinar si una variable es significativa con respecto al cambio de un resultado desde el punto de vista operativo y no debido al azar. En realidad se puede considerar que la PL permite realizar una función similar, pero sin considerar la aleatoriedad, cuando se analiza el dual de un problema directo, ya que permite comprobar cuál es la importancia relativa de cada restricción cuando se varía en una unidad su término independiente, pero no es un modelo estadístico.

El '*Modelo DPSIR*' tiene una aplicación directa en ciertos problemas de PL. Es en realidad un marco de referencia o 'framework' originado por la OCDE y una aplicación práctica del mismo en el ámbito de la PL puede apreciarse en el primer trabajo publicado que se menciona en esta tesis. Ver al efecto las filas de '*Pressure*', '*Condition*' y '*Response*', (ver figura 5.1 en la página 60 de este trabajo).

Si bien es cierto de que algunas de estas técnicas han sido objeto de tratamiento en trabajos mas recientes como en Calderón *et al*, (2009) y Joumard *et al* (2010), también hay que considerar que en ambos casos se aplican a problemas de transporte, disciplina

que no se trata en este trabajo. Por ejemplo, el trabajo de Joumard se refiere a sostenibilidad en el transporte, donde normalmente se entiende que no es posible trabajar con valores cuantitativos y cualitativos como lo hace el ejemplo de la tesis. Por otro lado el trabajo de Joumard habla de la '*Cadena de causalidad*', aspecto éste que también se considera en este trabajo de tesis cuando se desarrolló el concepto de '*Matriz encadenada*', en el acápite 3.2.1 (página 31) donde se la define, y cuya aplicación práctica se muestra en la figura 3.1 (página 32) para un proyecto de energía eólica.

### **3.1.2 Mecánica operativa**

La mecánica que se sigue en este trabajo utiliza dos elementos de amplia difusión que son la hoja Excel de cálculo y un agregado, el software Solver, para la resolución de problemas de decisión mediante el algoritmo del Simplex de Programación Lineal (PL), aunque puede emplearse cualquier otro software que emplee dicho algoritmo, tal como Lingo, Lindo, WinQSB, etc.

El problema a resolver se plantea en forma matemática construyendo en Excel una matriz de decisión, que es por otro lado el punto de partida de todas las metodologías para MCDA (Análisis para Decisiones Multicriterio). Los datos para construir la matriz de decisión pueden provenir de diversas fuentes y procedimientos - cuya obtención y análisis no es el objeto de esta tesis - que busca en cambio emplear esos datos para realizar el proceso de selección de alternativas.

La transferencia de datos entre Excel - o sea desde la matriz de decisión - al Solver, se lleva a cabo indicando en diversas ventanas de este último cómo encontrar en Excel la información pertinente. Así, se establece la fórmula de la función objetivo identificando la celda de Excel en donde se encuentra dicho dato y cuál es la acción que se quiere efectuar (maximizar el objetivo, minimizarlo, o que iguale a un cierto valor numérico). Se le informa también al Solver en qué lugar de Excel colocar el resultado, lo cual se lleva a cabo expresando el rango de columnas que abarca sobre una misma fila de la hoja de cálculo. Finalmente se le comunica a Solver acerca de todas las restricciones existentes indicando la ubicación de cada una en Excel, como así también el sentido de la acción en cada caso (maximizar, minimizar, o igualar la respectiva restricción), y señalando asimismo la ubicación en Excel de la celda que contiene el término independiente correspondiente a cada fila. Si se desea que el resultado quede expresado en números enteros o en el sistema binario ('0' y '1') se le indica también en Excel esta condición.

No hay límite para la cantidad de restricciones a considerar y existe además la posibilidad de instruir al Solver sobre la precisión con la cual se desea trabajar, es decir qué porcentaje se admite razonable para que se cumpla una restricción, (y que es generalmente muy pequeño), así como sobre la cantidad de iteraciones (normalmente 100 ó más), y la condición de que debe suministrar solo valores finales no negativos. El modelo permite especificar una serie de condiciones reales, tales como precedencias obligatorias entre alternativas (es decir que no se puede elegir una sin haber previamente elegido otra; por ejemplo, no se puede escoger un proyecto de asfaltado de

una avenida si no se ha elegido también efectuar previamente el alcantarillado de la misma), o condiciones de obligatoriedad (como las que se presentan en proyectos en donde al momento del análisis hay ya un proyecto en ejecución y que debe entonces estar obligatoriamente dentro de la solución final), o indicar que se admiten mezclas de alternativas (tal como aceptar la unión temporaria de empresas en una licitación).

Como queda dicho, el Solver resuelve el problema considerando todas las restricciones planteadas; si hay una solución factible lo indica taxativamente, y transfiere los resultados a Excel. Si no hay solución factible también lo anuncia, y aunque no expresa directamente la causa, ésta puede inferirse observando los valores parciales obtenidos para las restricciones.

Desgraciadamente, el método de PL permite operar sólo con un objetivo y con restricciones cuantitativas. El objeto de esta tesis es proponer un método que amplía considerablemente el campo de aplicación de la PL al permitirle trabajar con múltiples objetivos – tanto como se deseen – y con restricciones cuantitativas y cualitativas y aun con una mezcla de ambas, a fin de poder resolver problemas que no puede abordar la PL, y que son por otro lado, los más frecuentes en la práctica.

El objeto de esta tesis es proponer un método que amplía considerablemente el campo de aplicación de la PL al permitirle trabajar con múltiples objetivos – tanto como se deseen – y con restricciones objetivas y subjetivas y una mezcla de ambas, a fin de poder resolver problemas que no puede abordar la PL, y que son por otro lado, los mas frecuentes en la práctica..

### ***3.1.3 Arquitectura de Simus***

Simus está compuesto de tres módulos o rutinas (1, 2 y 4)<sup>3</sup> que complementan el algoritmo del Simplex en la resolución de un problema, y si bien el procedimiento es de aplicación general, el empleo de los módulos depende de las características de cada problema. A este respecto, Simus se emplea para resolver dos tipos de problemas, ambos complejos, que son:

*Tipo 1:* Problemas con cualquier cantidad de alternativas y restricciones, con criterios cuantitativos y cualitativos, con o sin mezcla de ambos, y con una o varias funciones objetivo, con resultados fraccionarios, enteros o binarios.

*Tipo 2:* Problemas relacionados con la selección de un número relativamente pequeño de indicadores (conjunto o núcleo final), a fijar por el usuario, a partir de una cantidad elevada (conjunto inicial), sujetos a distintas restricciones y con un solo objetivo, que es la maximización de la cantidad de información del entorno, que está contenida en el conjunto inicial de indicadores. Como ejemplo, si se tienen 187 indicadores

---

<sup>3</sup> El módulo 3, que no se aplica en este trabajo, se emplea para analizar la diferencia entre dos proyectos o alternativas que registran valores que permiten catalogarlos como ‘indiferentes’ en el ordenamiento.

medioambientales que definen el entorno medioambiental de una región, se desea tener un conjunto final reducido de quizás no más de 25 indicadores, que concentre la mayor cantidad posible de información sobre el estado y evolución de ese entorno.

### **3.2 Diagrama de flujo para la aplicación de Simus a problemas de tipo 1**

Es evidente que el empleo de cualquier método para la toma de decisiones necesita disponer de la información más confiable posible. Desde este punto de vista, e incorporado en el procedimiento Simus, se prevé el uso de varias herramientas tales como el análisis por grafos, las matrices encadenadas, las curvas de impacto, y las matrices 0-1 para procesar la información recogida.

Para armonizar este compendio de información (fuentes) y relacionarlas con el procedimiento Simus se ha preparado el diagrama de flujo de la figura 3.2, relativo al empleo de los módulos 1 y 2, y la figura 3.3 para el módulo 4, ambos diagramas en sus fases de Análisis, Modelación y Resultados.

#### **3.2.1 Fuentes**

Es imprescindible contar con información confiable y que proceda de diferentes fuentes, y la cual es además básica y dependiente del tipo de problema, para la selección de la cantidad y tipo de criterios a emplear para la evaluación de alternativas. Es por otro lado impracticable tratar de identificar todas las fuentes necesarias para obtener datos habida cuenta de la gran cantidad posible de proyectos; sin embargo, para proyectos de ingeniería, que se entienden son los más complejos, se parte de las siguientes fuentes:

*Estudio de factibilidad o de pre factibilidad* que nos informa de las características generales del proyecto y que permiten en la mayoría de los casos hacer una apreciación aproximada de los costes.

*Proyecto preliminar.* Es decir, un documento también aproximado pero en donde se especifican las características constructivas, que permite aquilatar las dificultades, los riesgos, estimar la necesidad de mano de obra, etc.

*Matriz encadenada (Z).* Es un documento gráfico asociado con Simus en donde se analizan para cada proyecto o alternativa, las diferentes *acciones* que producen impactos, los *efectos* que originan, las *consecuencias* de esos efectos, y finalmente los *receptores* de dichas consecuencias (Munier, 2010). La figura 3.1 reproduce una matriz de este tipo aplicada a un proyecto de construcción de un parque eólico en donde se muestran varios encadenamientos. Se verifica cómo para cada acción hay un encadenamiento cuyos diferentes pasos pueden ser valorizados, por ejemplo, en una escala 1-10.

La matriz Z permite estudiar las interrelaciones entre los cuatro elementos (Acciones – Efectos – Consecuencias – Receptores) y para cada alternativa. Posibilita determinar cuáles son los efectos más importantes, medidos por la cantidad de acciones que generan.



#### *Análisis de grafos*

Pueden emplearse para determinar en forma cuantitativa la importancia de diversos indicadores relativa a las vinculaciones directas e indirectas, a fin de establecer pesos a priori que posibiliten fijar una tasa de corte para el listado inicial. Trabaja con los efectos y permite valorarlos cuantitativamente. Estas valoraciones se pueden usar como coeficientes de las alternativas en la matriz de decisión.

#### *Encuestas*

Incluyen el diseño de un formulario adecuado y un muestreo estadístico. Se usan para conocer la opinión de la población que puede estar afectada por el proyecto.

#### *Análisis estadísticos*

Por ejemplo análisis de regresión y correlación, que aunque no lleguen a determinar necesariamente una relación de causa y efecto, pueden indicar si dos indicadores varían o no en el mismo sentido. Una aplicación se encuentra en la Sección 4.1.3, figura 4.1.

#### *Datos históricos*

Se obtienen no sólo de los archivos del promotor de un proyecto o de una compañía sino también de otros proyectos similares. Por ejemplo, se usa este procedimiento para determinar en forma aproximada, mediante una relación no lineal, el coste para un tamaño dado de planta, cuando se conocen los costes de plantas similares ya construidas.

#### *Reuniones con partes interesadas*

Aquí se escuchan, se debaten y se analizan las diversas opiniones, especialmente de la gente a ser afectada por el proyecto, como así también de diversos especialistas y expertos. Estas pueden grabarse y clasificarse por orden de importancia.

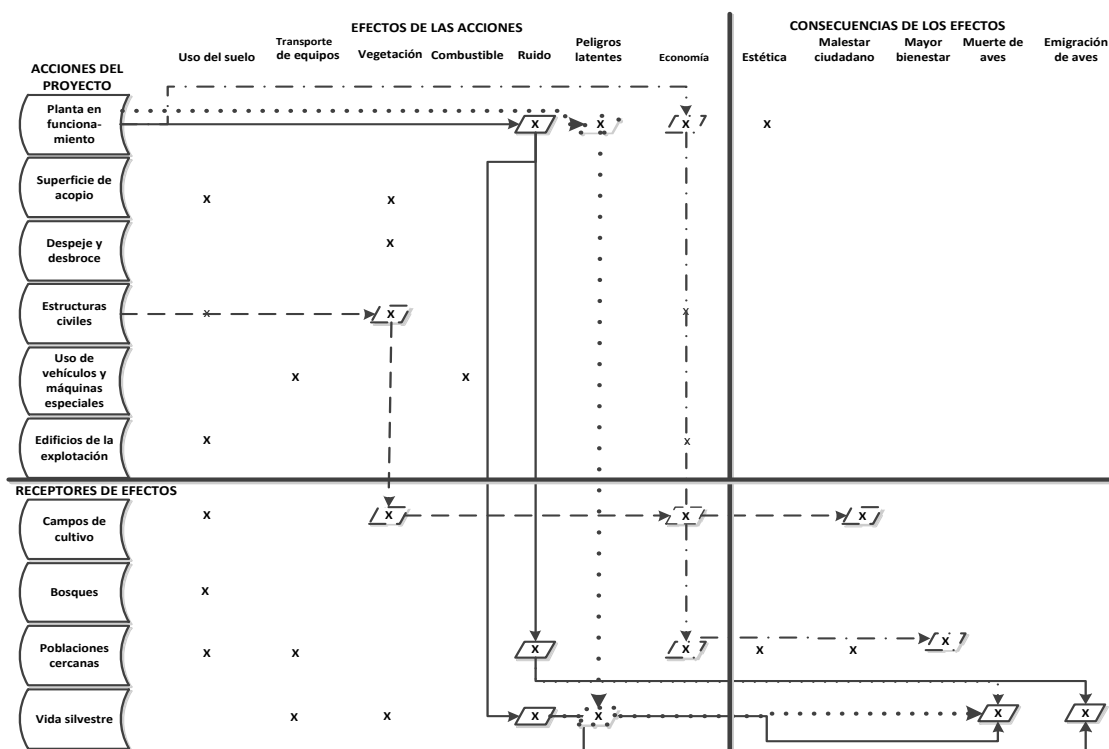


Figura 3.1 Matriz encadenada (Matriz Z) para un proyecto de parque eólico

### 3.2.2 Fase de Análisis

Consiste en la recolección, depuración y análisis de la información. (Los números entre paréntesis se corresponden con el diagrama de la figura 3.2).

*Primer paso:* Los distintos departamentos del promotor del proyecto (1) analizan el estudio de factibilidad y emiten sus conclusiones. Su fuente es el estudio de factibilidad,

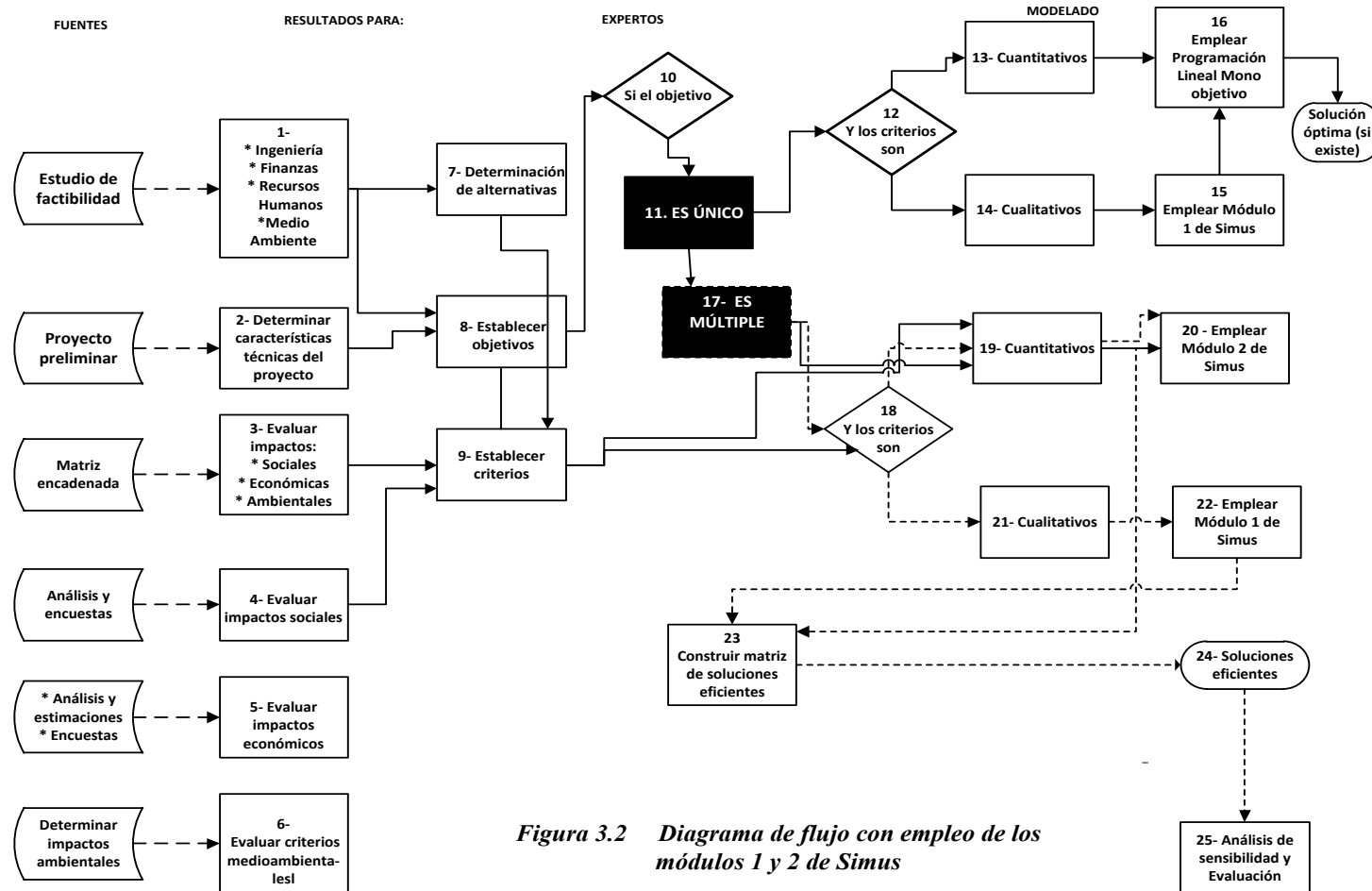
*Segundo paso:* Se conocen ahora las características técnicas del proyecto, como así también sus distintas alternativas y condiciones lo cuál permite determinar los diferentes criterios a aplicar (2),

*Tercer paso:* Se evalúan sus posibles impactos en los aspectos económicos, sociales y medioambientales (3), a partir de una matriz encadenada que indica los impactos seriados,

*Cuarto paso:* Se evalúan los impactos sociales (4) a partir de diversas fuentes tales como encuestas, estudios de impacto, exigencia en proyectos similares, etc. Permite decidir sobre los diferentes criterios a considerar,

*Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples*

33



*Figura 3.2 Diagrama de flujo con empleo de los módulos 1 y 2 de Simus*

*Quinto paso:* Se evalúan los impactos económicos (5). Permite determinar los diferentes criterios a considerar,

*Sexto paso:* Se evalúan los criterios medioambientales (6). Permite determinar los diferentes criterios a considerar.

### **3.2.3 Fases de modelación y resultados**

*Séptimo paso:* Se determinan las alternativas posibles de entre todas las existentes (7).

Fuente: Estudio de factibilidad y proyecto preliminar,

*Octavo paso:* Es necesario ahora, para el modelado, establecer el objetivo o los objetivos que se persiguen (8). Es decir, determinar si el funcional es monoobjetivo o de objetivos múltiples,

*Noveno paso:* Establecer criterios (9). Fuente: Departamentos del promotor, características técnicas del proyecto, matriz encadenada, etc.,

*Décimo paso:* Aquí hay que determinar si el objetivo es único o son varios (10),

*Décimo primer paso:* Si el objetivo es único (11), determinar qué tipo de criterios existen (12),

*Décimo segundo paso:* Si los criterios son todos de naturaleza cuantitativa (13), emplear PL mono objetivo (16),

*Décimo tercer paso:* Si los criterios son de naturaleza cualitativa o hay una mezcla con cuantitativos (14), emplear el modulo 1 de Simus (15) y proceder a resolver el sistema con PL monoobjetivo (16),

*Décimo cuarto paso:* Si el objetivo es múltiple (17), cabe ahora preguntar nuevamente por el tipo de criterios (18),

*Décimo quinto paso:* Si los criterios son cuantitativos (19), emplear el módulo 2 de Simus (20),

*Décimo sexto paso:* Si los criterios son cualitativos (21), o hay una mezcla con cuantitativos, emplear el módulo 1 de Simus (22),

*Décimo séptimo paso:* Construir la matriz de soluciones eficientes (23),

*Décimo octavo paso:* Determinar la solución satisfaciente (24),

*Décimo noveno paso:* Efectuar el análisis de sensibilidad y evaluación (25).

### **3.3 Diagrama de flujo para la aplicación de Simus a problemas de tipo 2**

Se recuerda que este módulo es para un problema diferente a los tratados y está enfocado a la selección de indicadores de distinto tipo. Aunque originariamente fue diseñado para tratar con indicadores ambientales, su empleo no está restringido a esta disciplina y puede utilizarse para cualquier tipo de indicadores.

#### **3.3.1 Fuentes**

Una de las principales fuentes son las series existentes de indicadores y que normalmente están disponibles para cada actividad, pero hay que recordar que el sistema se aplica para un número elevado de indicadores, posiblemente en cantidad mayor de 75.

Otra fuente es obviamente aquella que proviene de la necesidad de desarrollar indicadores, por ejemplo para analizar problemas urbanos y periurbanos, problemas sociales y económicos.

#### **3.3.2 Fase de Análisis**

Ver figura 3.3.

*Primer paso:* Los expertos examinan toda la información disponible (1),

*Segundo paso:* Se analiza la importancia de cada indicador en función de la cantidad de interrelaciones de carácter primario, secundario, terciario, etc. (2). Se valorizan empleando una escala tal como la de intervalos iguales, por ejemplo de 1 a 10 (4),

*Tercer paso:* Se determinan las necesidades de obtener determinado tipo y categoría de indicadores (3). Se valorizan empleando una escala tal como la de intervalos iguales, por ejemplo de 1 a 10 (5),

*Cuarto paso:* Con estas dos estimaciones se halla el promedio de valores para cada indicador (6),

*Quinto paso:* A fin de limitar la cantidad de indicadores se establece una tasa de corte (7),

*Sexto paso:* Preparar la lista inicial de indicadores con la valoración promedio hallada para cada uno (8),

*Séptimo paso:* Computar la entropía de cada indicador (9), empleando la fórmula (3.2) Sección 3.4.4,

*Octavo paso:* Determinar la entropía del sistema (10), empleando la fórmula (3.3), Sección 3.4.5.1,

*Noveno paso:* Determinar la contribución entrópica de cada indicador (11), empleando la formula (3.4), Sección 3.4.5.1,

*Décimo paso:* Emplear los valores del paso noveno como coeficientes de la función objetivo del problema (12).

### **3.3.3 Fases de modelación y resultados**

*Décimo primer paso:* Establecer qué criterio se usará sobre la base de los objetivos deseados o estructura, por ejemplo (OCDE), criterios generales de selección, etc., (13),

*Décimo segundo paso:* Establecer criterios de selección (14),

*Décimo tercer paso:* Establecer la matriz de pertenencia (0-1) (15),

*Décimo cuarto paso:* Determinar la cantidad de indicadores finales que se deseen (17),

*Décimo quinto paso:* Establecer los términos de la derecha sobre la base de las preferencias del centro decisor y a lo que él considere más necesario e importante (17),

*Décimo sexto paso:* Ejecutar el Simplex con el software que se haya elegido (18),

*Décimo séptimo paso:* Obtener los resultados y si es necesario llevar a cabo un análisis de sensibilidad (19),

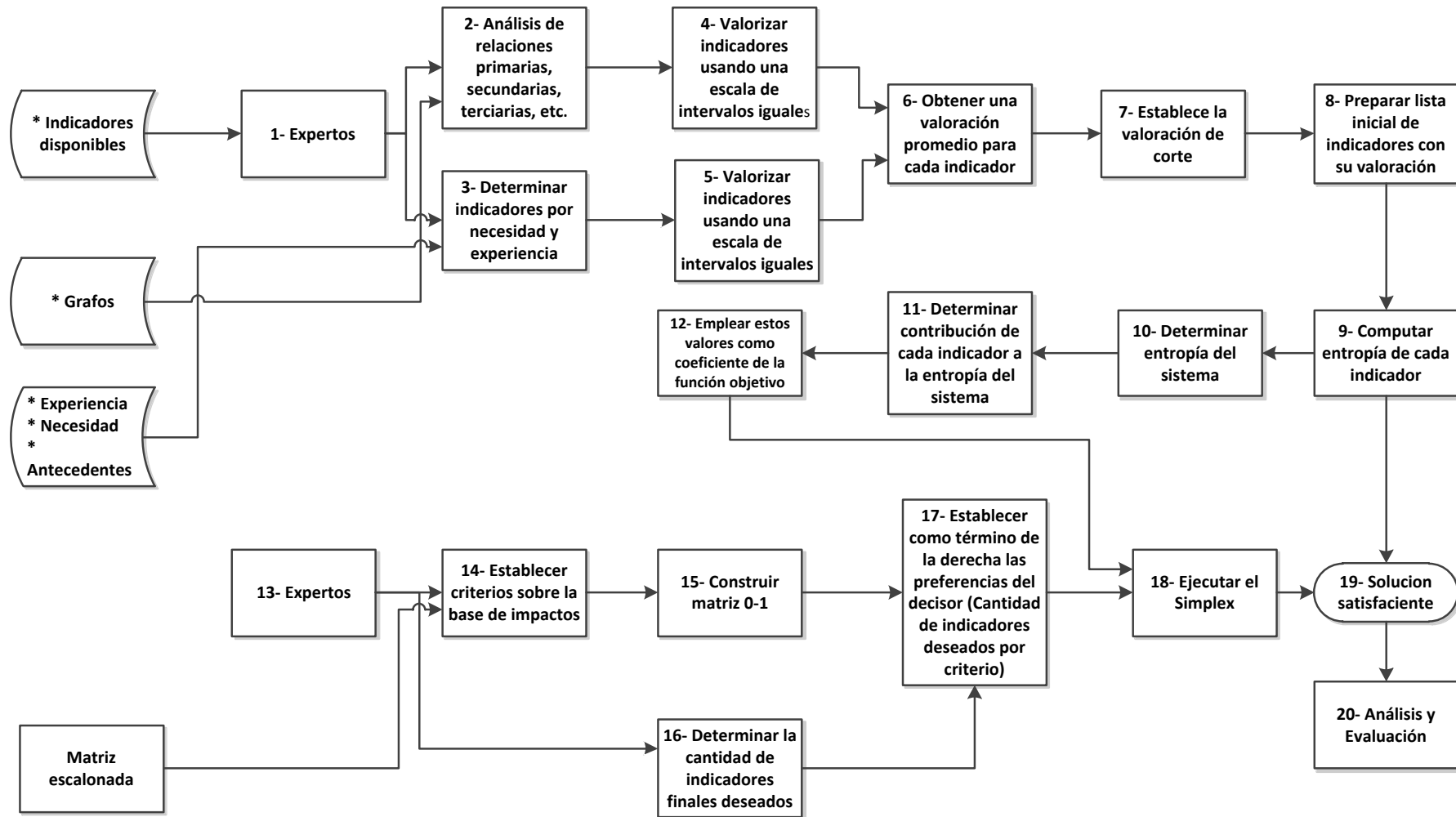
### **Décim 3.4 Descripción de los módulos**

Como se mencionó, la PL necesita criterios cuantitativos y sólo puede manejar un objetivo a la vez, arrojando soluciones óptimas. El método Simus introduce dos ‘módulos’ (1 y 2), o procedimientos algebraicos para tratar de paliar ambas condiciones, aunque no produce soluciones óptimas sino satisfactorias.

#### **3.4.1 Explicación y empleo del Módulo 1**

Se utiliza para permitir el empleo de criterios cualitativos - tantos como se deseen - y que pueden o no estar mezclados con criterios cuantitativos. Incluso permite resolver el problema aun cuando el total de las restricciones sean cualitativas. Para ilustrar el empleo de este módulo asúmase por ejemplo que para tres alternativas A, B y C de un proyecto, hay un criterio cualitativo que requiere maximizar la sensación de satisfacción de la población afectada por el mismo. Para tenerla en cuenta se realiza una encuesta y las respuestas se evalúan mediante 8 adjetivos, que se describen en la tabla 3.1.

*o octavo paso:* Evaluar los resultados (20).



**Figura 3.3** *Determinación de indicadores ambientales*

**Tabla 3.1** *Apreciaciones de la población consultada y equivalencia cuantitativa*

Calificación	Concepto
1	Muy negativa
2	Negativa
3	Regular
4	Aceptable
5	Buena
6	Satisfactoria
7	Muy buena
8	Excelente

Supóngase ahora que analizadas las respuestas, se encuentra que las diferentes alternativas han merecido en promedio, la siguiente ‘puntuación’ lingüística:

Alternativa A = Buena

Alternativa B = Excelente

Alternativa C = Negativa

Empleando la tabla 3.1 las apreciaciones subjetivas se transforman en

$$5 x_1 + 8 x_2 + 2 x_3 \leq ??$$

Faltaría en consecuencia el término independiente de la derecha. El Módulo 1 de Simus asigna al correspondiente término un valor igual al mayor coeficiente del término de la izquierda, si se está maximizando como en este caso, o el menor valor si se está minimizando, previa normalización. La razón de normalizar tiene que ver con el procedimiento, ya que si no se normaliza se genera incongruencia. Por ejemplo se pueden tener números enteros en un criterio y decimales en otro, la normalización permite trabajar con valores homogéneos. Hay varios métodos para normalizar y en general el procedimiento elegido depende de los datos y del tipo de problema planteado y de manera tal que mantenga las proporciones, lo que es clave en la PL; un ejemplo de los diferentes métodos se ilustra a continuación.

- Calcular para cada coeficiente su porcentaje con respecto al valor máximo de la fila correspondiente.

$$\frac{a_j}{\text{Max } a_j}$$

- Calcular para cada coeficiente su porcentaje sobre el rango de la fila correspondiente:

$$\frac{a_j - \min a_j}{\text{Max } a_j - \min a_j}$$

- Calcular para cada coeficiente su porcentaje con respecto al valor de la suma de todos los coeficientes sobre la misma fila (este es el método usado en esta tesis):



***Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples***

$$\frac{a_j}{\sum a_j}$$

Entonces, normalizando, dividiendo cada coeficiente por la suma de los coeficientes de la fila se tiene:

$$0,33x_1 + 0,53x_2 + 0,13x_3 \leq 0,53$$

Debido a que la acción de este criterio es de maximización, se elije el mayor de los valores de los términos de la izquierda, que es 0,53. La razón de esta selección estriba en que el máximo valor de satisfacción total deseado no puede ser superior al mayor valor ofrecido por la alternativa B. Por ello, se establece que la satisfacción total debe ser menor o igual a 0,53.

Si para ejemplificar, la misma restricción requiriera una minimización, la respectiva inecuación sería de la siguiente forma:

$$0,33x_1 + 0,53x_2 + 0,13x_3 \geq 0,13$$

Al término de la derecha le corresponde al menor valor de los términos de la izquierda, porque es evidente que la satisfacción total no puede ser inferior al menor valor ofrecido por la alternativa C. Por ello se establece que la satisfacción total debe ser mayor o igual a 0,13.

### ***3.4.2 Explicación y empleo del Módulo 2***

Se utiliza para trabajar con múltiples objetivos. Permite ordenar alternativas, de más a menos importantes, y trabajar con cualquier cantidad de objetivos.

Este módulo consiste en dos pasos que son:

a) La construcción de una matriz que se denomina '*Matriz de resultados eficientes*' y que contiene en *cada fila* el conjunto de resultados óptimos que se obtienen cuando se ejecuta el Simplex con *un objetivo a la vez*. Se realiza sucesivamente la ejecución del Simplex hasta considerar todos los objetivos del problema.

Una vez completada la matriz se normaliza y se suman los valores de *cada columna* (SC), (o sea la suma de los valores óptimos de cada alternativa *para diferentes objetivos*).

b) Se determina un '*Coeficiente de participación*' (CP) para cada alternativa, que es el ratio entre la cantidad de objetivos para los cuales esa alternativa tiene un valor, y la cantidad total de objetivos considerados. Estos coeficientes se normalizan, y luego se multiplicada cada uno por el SC respectivo. El resultado de este producto indica el valor final de cada alternativa, lo cual permite su ordenamiento.

### 3.4.2.1 Ejemplo ilustrativo de la aplicación de los módulos 1 y 2

Se ha proyectado la construcción de un camino entre dos ciudades A y B. Los terrenos a atravesar comprenden llanura, zona de estribaciones montañosas de baja altura, bosques, y el atravesar ciudades y pueblos. Se presentan tres rutas alternativas que hacen diferente uso de la tierra entre las dos localidades, y que se codifican como rutas A, B, y C, cada una con sus costes asociados en millones de Euros. Se desea determinar cuál es la ruta más conveniente, no sólo teniendo en cuenta los costes sino también los aspectos sociales y ambientales.

#### Primer paso: Construcción de la matriz de decisión

Se han hecho encuestas para determinar la reacción de la población ya que el proyecto incluye expropiar áreas de cultivo, y habrá alteración del ecosistema por la destrucción de gran número de árboles y zonas boscosas a atravesar, ríos a cruzar, etc. Los valores de la encuesta se detallan en la matriz de decisión. Por ejemplo, la fila de '*Porcentajes de rechazo por atravesar una zona turística*' depende de la ruta, pero es del 25 % para la traza A, 15 % para la B y 20 % para la C.

La matriz de decisión la tabla 3.2 plantea el modelado del problema.

#### Segundo paso: Normalización de la matriz.

Para la normalización puede emplearse alguno de los métodos mencionados. Aquí se usa el de dividir cada coeficiente por el total de la suma de los valores de su fila. Por ejemplo, para la segunda fila el total es  $0,90 + 0,92 + 0,90 = 2,72$ , se divide cada valor de esa fila por este total, y así se obtiene la matriz de decisión normalizada que muestra la tabla 3.3.

#### Tercer paso: Tratamiento de los criterios cualitativos.

Se observa que la mayoría de criterios son cualitativos, por lo cual se aplica el Módulo 1, incluso a los que son cuantitativos. Si bien es cierto que el porcentaje de cultivos y la cantidad de ríos a cruzar son en general de naturaleza cuantitativa, no hay que olvidar que en el momento del planeamiento se ignora la decisión que tomaran los dueños de

**Tabla 3.2**

**Matriz de decisión**

	Alternativas			
	Ruta A	Ruta B	Ruta C	Suma de
Criterios				filas
Costes estimados (Millones de €)	127.810	110.945	118.906	357.661
Porcentaje áreas de cultivo afectadas	0,9	0,92	0,9	2,72
Porcentaje de expropiaciones	0,92	0,34	0,26	1,52
Cantidad de ríos a cruzar	2		1	3,00
Bosques afectados (ha)	3	10	10	23,00
Porcentaje de oposición ciudadana	0,02	0,2	0,35	0,57
Porcentaje de alteración ecosistema	0,06	0,46	0,33	0,85
Porcentaje rechazo zona turística	0,25	0,15	0,2	0,60

***Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples***

Tabla 3.3

Matriz de decisión normalizada

	Alternativas					
	Ruta A	Ruta B	Ruta C			
Metas						
Costes estimados (Millones de €)	<b>0,36</b>	<u><b>0,31</b></u>	<b>0,33</b>	<b>0,31</b>	$\geq$	<b>0,31</b>
Porcentaje áreas de cultivo afectadas	<u><b>0,33</b></u>	<b>0,34</b>	<b>0,33</b>	<b>0,34</b>	$\geq$	<b>0,33</b>
Porcentaje de expropiaciones	<b>0,61</b>	<b>0,22</b>	<u><b>0,17</b></u>	<b>0,22</b>	$\geq$	<b>0,17</b>
Cantidad de ríos a cruzar	<b>0,67</b>	<u><b>0,00</b></u>	<b>0,33</b>	<b>0,00</b>	$\geq$	<b>0,00</b>
Bosques afectados (ha)	<u><b>0,13</b></u>	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>	$\geq$	<b>0,13</b>
Porcentaje de oposición ciudadana	<u><b>0,04</b></u>	<b>0,35</b>	<b>0,61</b>	<b>0,35</b>	$\geq$	<b>0,04</b>
Porcentaje de alteración ecosistema	<u><b>0,07</b></u>	<b>0,54</b>	<b>0,39</b>	<b>0,54</b>	$\geq$	<b>0,07</b>
Porcentaje rechazo zona turística	<b>0,42</b>	<u><b>0,25</b></u>	<b>0,33</b>	<b>0,25</b>	$\geq$	<b>0,25</b>

los terrenos de cultivo, ya que pueden destinarlos a otros usos, como por ejemplo engorde de ganado. Por otro lado, como tampoco se conoce en qué fecha se hará el cruce de los ríos, no se puede apreciar si esta operación se efectuará en épocas de crecidas o de estiaje. Por ello se creyó más seguro considerar a todos los criterios como cualitativos. Con respecto a medir criterios netamente cualitativos tales como la ‘Oposición ciudadana’, esta es el resultado de encuestas, entrevistas, reuniones con los interesados, votaciones, etc.

Ya que todos los criterios son de minimización, los términos independientes de la columna de la derecha tendrán los respectivos valores mínimos de cada fila, que se indican subrayados.

*Cuarto paso:* Construcción de la matriz de resultados eficientes.

Se comienza extrayendo de la tabla 3.3 la primera meta (*Costes estimados*), que actuará entonces como función objetivo de un problema monoobjetivo. Se ejecuta el Simplex empleando el software elegido y se obtienen los valores de las alternativas que se colocan en la primera fila de la matriz de resultados eficientes que muestra la tabla 3.4. Se aprecia que para esta función objetivo, no participa la alternativa C, en tanto que la alternativa B muestra un valor mucho más elevado que la alternativa A. Es decir, desde el punto de vista de este objetivo de costes, la mejor solución es la alternativa B, lo cual en cierta manera es previsible, dado que esta alternativa es la que registra el menor coste. Sin embargo, esto puede no suceder y entonces la ‘previsión’ no se cumple, y la razón es que ésta puede verse alterada por los condicionamientos impuestos por las otras 7 restricciones restantes.

Tabla 3.4

Matriz de resultados eficientes

	Alternativas			
	Ruta A	Ruta B	Ruta C	Suma de
Metas				filas
Costes estimados (Millones de €)	0,032	0,947		0,979
Porcentaje áreas de cultivo afectadas	0,817		0,055	0,872
Porcentaje de expropiaciones			1	1
Cantidad de ríos a cruzar		1		1
Bosques afectados (ha)	1			1
Porcentaje de oposición ciudadana	1			1
Porcentaje de alteración ecosistema	1			1
Porcentaje rechazo zona turística		1		1

Se reintegra esta función objetivo a la tabla 3.3, volviendo en consecuencia a ser una meta.

Se extrae la segunda meta (*Porcentaje de áreas de cultivo afectadas*), que actuará entonces como función objetivo de un problema monoobjetivo. Se ejecuta el Simplex empleando el software elegido y se obtienen los valores de las alternativas que se colocan en la segunda fila de la matriz de resultados eficientes que muestra la tabla 3.4. Se aprecia que para esta función objetivo, no participa la alternativa B, y que ahora la alternativa A tiene un valor muy elevado comparado con el de la alternativa C, aun cuando tienen el mismo porcentaje 0,9 (tabla 3.2), lo cual significa que intervienen otros factores para seleccionar la A en lugar de la C.

Se reintegra esta función objetivo a la tabla 3.3, volviendo en consecuencia a ser una meta.

Se extrae la tercera meta (*Porcentaje de expropiaciones*) y se repite el procedimiento, con lo cual se obtienen los valores que corresponden a la tercera fila de la tabla 3.4, que favorece de manera absoluta a la alternativa C, lo cual es también previsible, dado que C tiene el menor porcentaje. Aquí cabe el mismo análisis sobre ‘previsión’ que se hizo para el primer objetivo.

Se prosigue de la misma manera con todas las metas hasta completarlas y se tiene entonces constituida en forma completa la matriz de resultados eficientes de la tabla 3.4.

Las celdas en blanco indican que para un determinado objetivo hay alternativas que no se han elegido.

#### *Quinto paso:* Normalización de la matriz de resultados eficientes

Se normaliza cada fila siguiendo el mismo procedimiento ya explicado, y se obtiene la tabla 3.5 o sea la matriz de resultados eficientes normalizada.

**Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la  
selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con  
objetivos múltiples**

Tabla 3.5

Matriz de resultados eficientes normalizada

		Ruta A	Ruta B	Ruta C		
	Criterios	Alternativas				
	Costes estimados (Millones de €)	0,033	0,967			
	Porcentaje áreas de cultivo afectadas	0,937		0,063		
	Porcentaje de expropiaciones			1		
	Cantidad de ríos a cruzar		1			
	Bosques afectados (ha)	1				
	Porcentaje de oposición ciudadana	1				
	Porcentaje de alteración ecosistema	1				
	Porcentaje rechazo zona turística		1			
					Suma de	
	Suma de columnas (SC)	3,970	2,967	1,063	filas	
	Coefficiente de participación (CP)	0,625	0,375	0,250	1,250	
	Coefficiente de participación normalizado (CPN)	0,500	0,300	0,200		
	Resultado (CPN x SC)	1,98	0,89	0,21		

*Sexto paso:* Determinación de la importancia de cada alternativa.

La fila (SC) de la tabla 3.5 muestra la suma de los valores para cada columna. Aquí se muestra entonces que desde el punto de vista de la magnitud de los valores hallados, la alternativa preferida es la A, luego la C y finalmente la B.

*Séptimo paso:* Cálculo del coeficiente de pertenencia (CP).

Si se analiza para cada alternativa la cantidad de veces que esta figura en las soluciones se tienen los siguientes valores:

Alternativa A = 5 (ya que participa en las soluciones correspondientes a los objetivos 1, 2, 5, 6, y 7),

Alternativa B = 3 (ya que participa en los objetivos 1, 4 y 8),

Alternativa C = 2 (ya que participa en los objetivos 2 y 3).

Se calcula entonces el coeficiente de participación (CP) que será, considerando un total de 8 objetivos:

Alternativa A =  $5 / 8 = 0,625$ ,

Alternativa B =  $3 / 8 = 0,375$ ,

Alternativa C =  $2 / 8 = 0,250$ .

*Octavo paso:* Normalización de los CP que se indica en la fila CPN.

*Noveno paso:* Cálculo final.

Para cada columna se multiplica el CPN por la SC y se obtienen los valores finales para cada alternativa.

*Resultado:* Los valores hallados indican que la alternativa A, con la valoración más elevada, es la más conveniente, seguida por la B y la C.

Por lo tanto el ordenamiento final es:

**A - B - C**

### 3.4.3 Equivalencia del resultado alcanzado por Simus

En la sección 2.8.1 se realizó un estudio comparativo sobre distintos modelos, empleando un caso real, para contrastar resultados, que se repiten a continuación, pero ahora con el agregado de la solución alcanzada por Simus. Ver tabla 3.6.

**Tabla 3.6. Resultados de los distintos modelos para el aeropuerto de Maastricht**

	ALTERNATIVAS				Fuente
	A	B	C	D	
MODELOS					
Regime/AHP/Flag	0,34	0,94	0,61	0,11	Vreeker <i>et al</i> , 2001
AHP	0,07	0,18	0,15	0,09	García <i>et al</i> , 2009
ANP	0,05	0,09	0,08	0,06	García <i>et al</i> , 2009
Promethee	-0,25	0,19	0,01	0,00	García <i>et al</i> , 2009
Topsis	0,57	0,73	0,35	0,50	Munier, 2011
Simus	0,37	1,56	1,058	0,29	Munier, 2011

Por otro lado, la tabla 3.7 refleja el ordenamiento obtenido por Simus que se agrega a los ordenamientos por los otros métodos.

**Tabla 3.7 Ordenamientos de acuerdo a cada modelo**

MODELOS	ORDENAMIENTOS
Regime/AHP/Flag	B – C – A - D
AHP	B – C – D - A
ANP	B – C – D - A
Promethee	B – C - A
Topsis	B – A – D - C
Simus	B – C – A - D

Se aprecia que Simus obtiene ordenamientos equivalentes a los de los otros métodos.

### 3.4.4 Cálculo de la entropía para cada conjunto de resultados

Normalmente interesa evaluar la diferencia entre dos valores contiguos o entre los valores extremos de un resultado, para conocer en qué medida una alternativa puede considerarse mejor que otra, ya que es indudable que si una alternativa A por ejemplo, tiene el valor 0,36 y otra B el valor 0,37, ambas pueden considerarse como equivalentes en lo relativo a su posición en el ordenamiento. En consecuencia, es evidente que mientras mayor sea la diferencia, o sea mientras más discriminante sea la solución, mayor será la seguridad de elegir entre una alternativa y otra.

***Procedimiento fundamentado en la programación lineal para la selección de alternativas en proyectos de naturaleza compleja y con objetivos múltiples***

Observando la tabla 3.7 se verifica que ésta muestra, por simple observación, cuál de los modelos arroja la mayor discriminación, aunque es dificultoso llegar a una conclusión. Este trabajo propone emplear el concepto desarrollado por Zeleny (2000) para medir el grado de discriminación, aplicando el ya mencionado teorema de Shannon (Shannon, 1948). El resultado se muestra en la tabla 3.8, que agrupa los distintos métodos de acuerdo a su entropía. Se recuerda que la discriminación es mayor mientras menor sea la entropía, y se verifica que, de acuerdo a este procedimiento, tanto el método seguido por los autores como Simus arrojan la mayor discriminación.

**Tabla 3.8 Listado de modelos según su entropía**

Modelos	Alternativas				Entropía
	A	B	C	D	
Regime	-0,36	-0,36	-0,30	-0,16	<b>0,29</b>
Simus	-0,25	-0,35	-0,36	-0,21	<b>0,29</b>
AHP	-0,28	-0,37	-0,36	-0,31	<b>0,33</b>
ANP	-0,31	-0,36	-0,36	-0,33	<b>0,34</b>
Topsis	-0,35	-0,37	-0,29	-0,34	<b>0,34</b>

Se ha descartado el modelo Promethee ya que suministra valores muy extremos, dado que estos oscilan entre -0,25 y 0,19. Se aprecia que los valores extremos, considerando todos los modelos varían en  $(0,34 - 0,29) / 0,29 = 0,17 = 17\%$ .

#### **3.4.5 Explicación y empleo del Módulo 4**

Se aplica también a problemas de decisión, sin embargo se emplea para tratar un caso distinto de los tratados, ya que es específico a la situación donde hay una gran cantidad de elementos discretos (quizás varios cientos) y se desea obtener un conjunto final reducido, de quizás un 10 o 15 % de esa cantidad. Se aplica fundamentalmente a la selección de indicadores e introduce además la condición de que los indicadores seleccionados incorporen la mayor cantidad de información posible. Puede generar una solución óptima, ya que trabaja con un solo objetivo. Los criterios se emplean aquí como se ha visto en otros casos para evaluar los indicadores, sin embargo, el centro decisor puede desear establecer que haya una cierta cantidad mínima de indicadores por criterio. Por ejemplo si un criterio importante es '*minimizar el consumo de agua*', quizás el centro decisor no se conforma con tener sólo ese indicador, dada la importancia del tema, y entonces desea algunos otros relacionados con el mismo. En ese caso el resultado puede indicar que para este criterio se dispondrá asimismo de indicadores tales como '*pérdidas de agua en la red*' y también de otro como '*relación entre la provisión diaria de agua y la descarga de aguas servidas*'

### 3.4.5.1 Explicación detallada de los pasos a seguir para aplicar el módulo 4

*Primer paso:* Consiste en una preselección de los indicadores disponibles. Ésta se ejecuta combinando dos evaluaciones:

- a) La importancia del indicador referida a la cantidad de otros indicadores a las cuales influye (a) y
- b) La apreciación personal de los analistas considerando la necesidad del problema a tratar (b),

*Segundo paso.* Se halla el promedio entre ambas mediciones para cada indicador,

$$P_j = \frac{(a+b)}{2} \quad (3.1)$$

*Tercer paso:* Se calcula la entropía de cada indicador mediante la fórmula:

$$S_j = P_j \ln (P_j) \quad (3.2)$$

y la del sistema en general, mediante la fórmula:

$$S = - \frac{1}{N} \sum_1^n P_j \ln(P_j) \quad (3.3)$$

Donde:

N = Cantidad total de indicadores

*Cuarto paso:* Se calcula la participación entrópica de cada indicador  $x_j$  en la entropía del sistema, mediante la fórmula:

$$x_{\text{entrópico}} = P_j \times S \quad (3.4)$$

*Quinto paso:* Se emplean estos valores como coeficientes de la función objetivo que consiste en maximizar el contenido de la información, de acuerdo al teorema de Shannon (1948) entonces:

$$Z = x_{\text{entrópico}} \times x_j \quad (\text{Maximizar la cantidad de información}) \quad (3.5)$$

*Sexto paso:* Se establecen los criterios del problema a los cuales deben ajustarse los indicadores. Es de destacar que se entiende como “*criterio a los objetivos, atributos o metas que se consideran relevantes en un cierto problema decisional*” (Romero, 1996).

*Séptimo paso:* Se establecen relaciones de pertenencia entre cada alternativa y cada criterio, empleando una matriz 0-1. Para ello se construye una ‘*matriz de pertenencia*’ (tabla 3.9) con indicadores en columnas y criterios de selección en filas, tantos como se deseen en ambos. En este ejemplo se consideran sólo los indicadores  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$  y  $x_7$ .

Los expertos analizan para cada indicador con cual criterio está relacionado, y una vez que se llega a un acuerdo, se coloca un (1) si hay pertenencia.



Esta matriz es en realidad una matriz de decisión, en la cual son conocidas las columnas de acción (Maximizar o Minimizar) y de límites o términos de la derecha (que aquí se denominan '*Cantidades requeridas*'). Esta columna de requerimientos expresa los deseos del centro decisor relativos a la cantidad de indicadores que desea obtener para cada criterio y que depende de sus preferencias o necesidades. Por ejemplo, para el criterio C2 puede decir '*Quiero al menos 3 indicadores que se refieran a este criterio*'. Obsérvese la condición de '*al menos*', lo cual está indicando una relación de mínimo, expresada por el operador ' $\geq$ '.

**Tabla 3.9** *Matriz de pertenencia*

Cantidad total de indicadores deseados = k									
X entrópico	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>		x <sub>n</sub>	Acción	Preferencias del centro decisor	Cantidad requerida de indicadores por criterio
<b>Indicadores</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	..... .....	<b>n</b>			
<b>Criterios</b>				1					
<b>C1</b>	1		1						
<b>C2</b>	1	1		1			$\geq$	Elegir al menos	3
<b>C3</b>		1	1						
.....									
.....									
<b>Cm</b>									
Indicadores seleccionados		1		1					

En consecuencia esa fila queda expresada como una inecuación del tipo:

$$x_4 + x_5 + \dots + x_7 \geq 3 \quad (3.6)$$

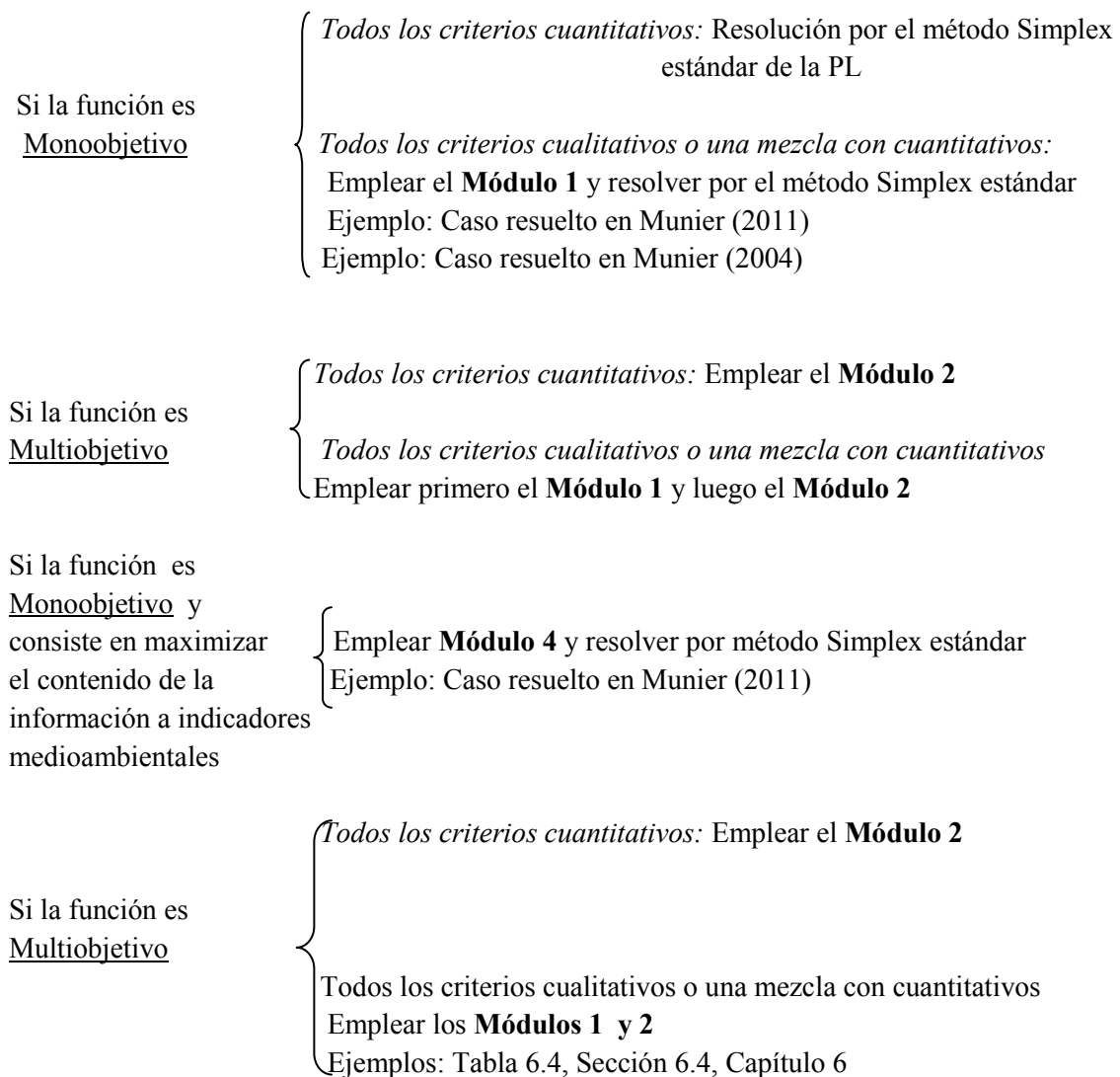
*Octavo paso:* Se establece la cantidad total de indicadores finales (k) que se desee obtener (Primera fila de la tabla).

*Noveno paso:* Se ejecuta el Simplex cuya función objetivo es '*Maximizar la cantidad de información*'.

El resultado, indicado en forma binaria se indica en la última fila de la tabla. Este resultado es el conjunto de indicadores, en la cantidad deseada, que cumplen con todas las restricciones del problema y que además maximizan la cantidad de información. Este último concepto, dicho de otra manera puede enunciarse como la mínima cantidad de indicadores que mejor representan las condiciones ambientales.

### 3.4.6 Cuadro sinóptico de funciones monoobjetivo y multiobjetivo y módulos a emplear

El cuadro sinóptico de la figura 3.4 condensa esta información para las funciones monoobjetivo y multiobjetivo



**Figura 3.4** Cuadro sinóptico para procedimientos con funciones monoobjetivo y multiobjetivo

### 3.4.7 Análisis de sensibilidad

Es de destacar que desde el punto del análisis de sensibilidad, el Solver provee tres diferentes mecanismos que son:

\* *Límites:* Se aplica a los valores hallados en la solución.

Establece valores mínimos y máximos que puede tomar cada alternativa para satisfacer todas las restricciones del problema, cumpliendo las restricciones y manteniendo constantes el resto de las alternativas.

\* *Sensibilidad:* Se aplica a las restricciones.

Informa para cada restricción cuanto puede cambiar el término independiente sin que cambie el valor dual. Es decir, una vez conocidas las restricciones que forman parte de la solución, informa en cuánto puede variar cada una (es decir cuanto puede trasladarse paralelamente a si misma), para que siga perteneciendo a la solución.

\* *Respuesta:* Se aplica a la solución y a las restricciones

Informa cuales son las restricciones que participan en la solución y suministra sus valores marginales.

El modelo Simus aprovecha las ventajas inherentes al análisis de sensibilidad que provee la PL; para ello emplea el dual para determinar cuáles son los criterios más importantes para cada objetivo planteado. Conociendo la cantidad de veces en que una restricción interviene en la gama completa de objetivos planteados, es posible establecer cuantitativamente un ranking sobre la importancia de cada uno.

En el caso de esta tesis este análisis de sensibilidad se ha empleado para contrastar resultados con otros modelos, pero lógicamente el análisis de sensibilidad tiene otros alcances aparte del descrito, y por otro lado la contratación se puede efectuar por otros medios, como se muestra en la Sección 6.4.



## CAPÍTULO 4 CASOS DE ESTUDIO

Este capítulo tiene por objeto mostrar el empleo de Simus para tratar proyectos con múltiples objetivos. Para ello se contrastan los resultados alcanzados al resolver un problema por Simus y por el método Electre.

### 4.1 Resolución por Simus de un problema real complejo - Contrastación de resultados alcanzado con Electre

Este caso corresponde a un proyecto titulado '*Desarrollo de la tierra en el puerto de Keelung*'

Título original: "*Multicriteria decision-making using Electre*" - Desarrollado por Huang *et al*, (2005).

#### 4.1.1 Antecedentes

El proyecto consiste en decidir el uso a dar a la tierra en el puerto de Keelung en Taiwán. Para ello se consideran 6 alternativas etiquetadas con letras, desde A a F, y 18 criterios. Tanto las alternativas como los criterios se identifican en la matriz de decisión de la tabla 4.1. El problema se resolverá por Simus y sus resultados se analizarán y compararán con los obtenidos por los autores que emplearon el método Electre.

Las seis alternativas están indicadas en columnas en tanto que los 18 criterios corresponden a las filas. Los valores de los coeficientes de las alternativas han sido calculados por los autores originales. Se aprecia que la gran mayoría de los criterios son cualitativos y que responden a acciones de maximizar y minimizar.

La ordenación obtenida por los autores es **A – F – B/C – E – D**.

La barra '/' entre B y C indica que ambas alternativas tienen valores muy semejantes y que, por lo tanto, es indistinto que en el tercer lugar se considere una u otra.

#### 4.1.2 Resolución por Simus utilizando los Módulos 1 y 2

Se comienza normalizando la matriz de la tabla 4.1; la matriz normalizada se muestra en la tabla 4.2.

La columna de '*Limites requeridos*' muestra la adopción del módulo 1 de Simus, es decir asignar al término independiente de la derecha y, para cada fila, el mayor o menor valor (de acuerdo al operador), de los valores situados a la izquierda. Así, para el primer criterio cuya acción es '*menor o igual que*' se ha elegido el mayor valor, o sea 0,19, en tanto que para el segundo, con acción de '*mayor o igual que*' se ha elegido el menor valor, o sea 0,13.

A continuación se aplicó el módulo 2, referido a la construcción de la matriz de resultados eficientes, que se muestra en la tabla 4.3, la cual, normalizada, se reproduce como tabla 4.4. Ésta indica el resultado final que es:

$$\mathbf{A - F - B - C - E/D}$$

*Comparación de las dos soluciones*

Las dos soluciones encontradas, es decir la de los autores y la de Simus, se reproducen en conjunto para facilitar su comparación.

Autores

$$\mathbf{A - F - B/C - E/D}$$

Simus

$$\mathbf{A - F - B - C - E/D}$$

**Tabla 4.1**

**Matriz de decisión para el proyecto en el puerto de Keelung**

						ALTERNATIVAS						
						A	B	C	D	E	F	
						Factibilidad regional y de transporte	Factibilidad económica y financiera	Cumplimiento del interés público	Impacto en el medio ambiente	Factibilidad política y de implementación	Comportamiento para la defensa nacional	Suma de cada fila
I.D.			CRITERIOS									
1			Conveniencia para transporte externo			6	7	6	7	8	8	42
2			Espacios para requerimientos			69,9	89,9	70,1	89,9	99,9	99,9	519,6
3			Localización geográfica			7	8	6	7	6	6	40
4			Factibilidad financiera			149	8	143	60	64	80	504
5			Mejora de la competitividad del puerto			9	9	5	7	4	6	40
6			Asegurar integración eficiente del puerto y de la ciudad			6	7	5	6	4	3	31
7			Políticas gubernamentales y tendencia			49,1	50,1	59,5	49,8	39,7	40,2	288,4
8			Estímulo al desarrollo ind. y oportunidades de trabajo			300	280	220	245	220	230	1495
9			Ruido y contaminación del aire			8	8	7	8	6	8	45
10			Impacto en la ecología y en el paisaje			8	4	6	8	4	5	35
11			Compatibilidad con el patrimonio cultural e histórico			9	5	5	5	7	5	36
12			Dificultad de las tecnologías ingenieriles			6	6	6	7	7	9	41
13			Voluntad y cooperación pública			95,4	34,3	40,2	29,8	45,6	60,8	306,1
14			Coordinación con unidades relevantes			9	8	8	7	9	8	49
15			Factibilidad de cumplimentar las normas legales			80,1	59,9	90,1	58,9	99,8	89,5	478,3
16			Asegurar la seguridad general en el puerto			2	4	10	3	5	10	34
17			Comportamiento general para la capacidad de combate			2	4	10	3	6	10	35
18			Asegurar la seguridad de las naves de guerra			2	4	10	3	6	10	35

Tabla 4.2

Matriz de decisión normalizada

				ALTERNATIVAS										
				A	B	C	D	E	F					
				Factibilidad regional y de transporte	Factibilidad económica y financiera	Cumplimiento del interés público	Impacto en el medio ambiente	Factibilidad política y de implementación	Comportamiento para la defensa nacional					
										Resultado	Operador	Límites requeridos		
ID.	CRITERIOS DE SELECCIÓN			COEFICIENTES DE LAS ALTERNATIVAS						Acción	del cálculo	Operador	Módulo 1	
1	Conveniencia para transporte externo			1	0,14	0,17	0,14	0,17	0,19	0,19	MAX	0,190	≤	0,19
2	Espacios para requerimientos			2	0,13	0,17	0,13	0,17	0,19	0,19	MIN	0,196	≥	0,13
3	Localización geográfica			3	0,18	0,20	0,15	0,18	0,15	0,15	MAX	0,212	≤	0,20
4	Factibilidad financiera			4	0,30	0,02	0,28	0,12	0,13	0,16	MAX	0,060	≤	0,30
5	Mejora de la competitividad del puerto			5	0,23	0,23	0,13	0,18	0,10	0,15	MAX	0,225	≤	0,23
6	Asegurar integración eficiente del puerto y de la ciudad			6	0,19	0,23	0,16	0,19	0,13	0,10	MAX	0,230	≤	0,23
7	Políticas gubernamentales y tendencia			7	0,17	0,17	0,21	0,17	0,14	0,14	MAX	0,190	≤	0,21
8	Estímulo al desarrollo ind. y oportunidades de trabajo			8	0,20	0,19	0,15	0,16	0,15	0,15	MAX	0,200	≤	0,20
9	Ruido y contaminación del aire			9	0,18	0,18	0,16	0,18	0,13	0,18	MIN	0,194	≥	0,13
10	Impacto en la ecología y en el paisaje			10	0,23	0,11	0,17	0,23	0,11	0,14	MIN	0,145	≥	0,11
11	Compatibilidad con el patrimonio cultural e histórico			11	0,25	0,14	0,14	0,14	0,19	0,14	MAX	0,163	≤	0,25
12	Dificultad de las tecnologías ingenieriles			12	0,15	0,15	0,15	0,17	0,17	0,22	MIN	0,174	≥	0,15
13	Voluntad y cooperación pública			13	0,31	0,11	0,13	0,10	0,15	0,20	MAX	0,134	≤	0,31
14	Coordinación con unidades relevantes			14	0,18	0,16	0,16	0,14	0,18	0,16	MAX	0,184	≤	0,18
15	Factibilidad de cumplimentar las normas legales			15	0,17	0,13	0,19	0,12	0,21	0,19	MAX	0,156	≤	0,21
16	Asegurar la seguridad general en el puerto			16	0,06	0,12	0,29	0,09	0,15	0,29	MAX	0,148	≤	0,29
17	Comportamiento general para la capacidad de combate			17	0,06	0,11	0,29	0,09	0,17	0,29	MAX	0,147	≤	0,29
18	Asegurar la seguridad de las naves de guerra			18	0,06	0,11	0,29	0,09	0,17	0,29	MAX	0,147	≤	0,29
Vector de los sucesivos resultados de SIMUS					0,000	0,806	0,038	0,113	0,119	0,048				
Función objetivo 0,2118														
Ordenamiento de autores empleando Electre:				A - F- B/C -E/D										



**Tabla 4.3**

**Matriz de resultados eficientes**

							ALTERNATIVAS						
							A	B	C	D	E	F	
							Factibilidad regional y de transporte	Factibilidad económica y financiera	Cumplimiento del interés público	Impacto en el medio ambiente	Factibilidad política y de implementación	Comportamiento para la defensa	Suma de filas
Conveniencia para transporte externo										0,64		0,56	1,21
Espacios para requerimientos							0,11					0,61	0,72
Localización geográfica							0,18	0,29	0,02	0,67			1,15
Factibilidad financiera							0,40		0,68				1,08
Mejora de la competitividad del puerto								1,00					1,00
Asegurar integración eficiente del puerto y de la ciudad							0,35	0,69					1,04
Políticas gubernamentales y tendencia									0,93	0,22			1,15
Estimulo al desarrollo ind. y oportunidades de trabajo							0,60		0,00	0,50	0,00		1,11
Ruido y contaminación del aire										0,11	0,78		0,88
Impacto en la ecología y en el paisaje											0,24	0,50	0,74
Compatibilidad con el patrimonio cultural e histórico							1,00						1,00
Dificultad de las tecnologías ingenieriles								0,66		0,16			0,82
Voluntad y cooperación pública							1,00						1,00
Coordinación con unidades relevantes							0,48	0,13			0,53		1,14
Factibilidad de cumplimentar las normas legales									0,37		0,23	0,50	1,10
Asegurar la seguridad general en el puerto								0,20	0,39			0,53	1,12
Comportamiento general para la capacidad de combate							0,00	0,08	0,25	0,00	0,16	0,66	1,15
Asegurar la seguridad de las naves de guerra							0,00		0,25	0,00	0,16	0,66	1,07

Tabla 4.4

Matriz de resultados eficientes normalizada

				ALTERNATIVAS					
				Factibilidad regional y de transporte	Factibilidad económica y financiera	Cumplimiento del interés público	Impacto en el medio ambiente	Factibilidad política y de implementación	Comportamiento para la defensa nacional
				A	B	C	D	E	F
Conveniencia para transporte externo							0.53		0.47
Espacios para requerimientos				0.15					0.85
Localización geográfica				0.16	0.25	0.01	0.58		
Factibilidad financiera				0.37		0.63			
Mejora de la competitividad del puerto					1.00				
Asegurar integración eficiente del puerto y de la ciudad				0.33	0.67				
Políticas gubernamentales y tendencia						0.81	0.19		
Estímulo al desarrollo ind. y oportunidades de trabajo				0.54			0.45		
Ruido y contaminación del aire							0.12	0.88	
Impacto en la ecología y en el paisaje								0.33	0.67
Compatibilidad con el patrimonio cultural e histórico				1.00					
Dificultad de las tecnologías ingenieriles					0.80		0.20		
Voluntad y cooperación pública				1.00					
Coordinación con unidades relevantes				0.42	0.11			0.47	
Factibilidad de cumplimentar las normas legales						0.33		0.21	0.46
Asegurar la seguridad general en el puerto					0.18	0.35			0.47
Comportamiento general para la capacidad de combate					0.07	0.22		0.14	0.57
Asegurar la seguridad de las naves de guerra						0.24		0.15	0.62
Suma de columnas (SC)				3.97	3.08	2.59	2.07	2.17	4.10
Factor de participación (FP)				0.44	0.39	0.39	0.33	0.33	0.39
Factor de participación normalizado (FPN))				0.20	0.17	0.17	0.15	0.15	0.17
Resultado = (SC) x (FPN)				0.77	0.53	0.44	0.30	0.32	0.70
Ordenamiento:				A - F - B - C - E/D					

#### **4.1.3 Correlación entre los resultados de ambos métodos**

Considerando ahora que la solución dual del Simplex produce los valores cuantitativos marginales de aquellos criterios que participan en la solución, es decir los criterios cuyas líneas, planos o hiperplanos determinan el punto de óptimo, existe entonces para cada solución un conjunto de criterios que tienen la mayor significación en el problema. En consecuencia, es posible evaluar la importancia de un criterio dado teniendo en cuenta la cantidad de soluciones en las cuales participa.

Por ejemplo, cuando se emplea como objetivo la meta número 03, '*Localización geográfica*', la correspondiente solución dual (no mostrada), está compuesta por cinco valores que se corresponden a otras tantas metas o restricciones del problema. Esas metas se detallan en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5**                      *Valores marginales correspondientes a la función objetivo '*Localización geográfica*'*

<b>Metas número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor marginal</b>
<b>1</b>	Conveniencia para el transporte externo	<b>0,228</b>
<b>5</b>	Mejorar la competitividad del puerto	<b>0,169</b>
<b>6</b>	Asegurar la integración eficiente del puerto y la ciudad	<b>0,261</b>
<b>8</b>	Estímulo al desarrollo industrial y oportunidades de trabajo	<b>0,270</b>
<b>14</b>	Coordinación con unidades relevantes	<b>0,089</b>

Se aprecia que la meta o criterio que mayor influencia tiene en la función objetivo es la número 8, seguida por la 6, la 1, la 5 y la 14. Por lo tanto, en el espacio de 6 dimensiones al que pertenece este ejemplo, hay 5 hiperplanos que definen la solución óptima, conformada por las alternativas A (0.18), B (0.29), C (0.02) y D (0,67) (tabla 4.3).

Un análisis similar se ha realizado este análisis para cada objetivo, y los resultados se detallan en la tabla 4.6.

La tabla 4.7 muestra, para una misma meta o criterio:

- a) el valor del peso asignado por los autores originales del trabajo,
- b) la cantidad de veces que un criterio o meta forman parte de una solución, de acuerdo con la tabla 4.6.

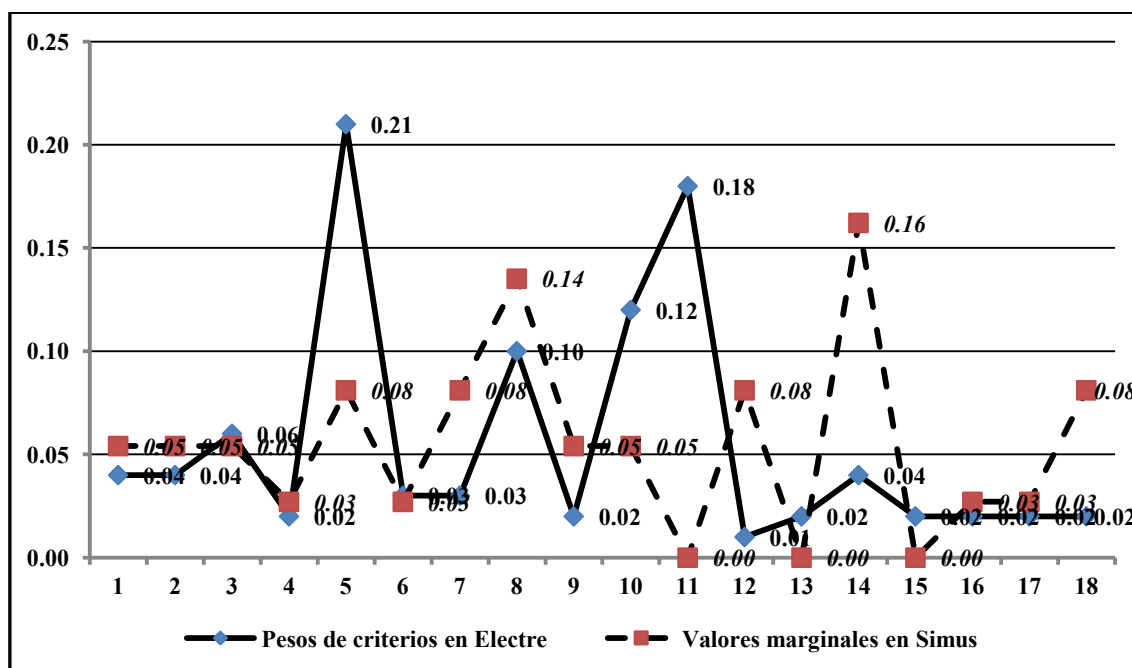
**Tabla 4.6** *Datos para efectuar una concordancia entre pesos de criterios y valores marginales*

					Para la función objetivo correspondiente a cada fila las metas que conforman la solución son:
<b>I.D.</b>	<b>Funciones objetivo</b>				
<b>1</b>			Conveniencia para transporte externo		<b>3 - 14</b>
<b>2</b>			Espacios para requerimientos		<b>9 - 12</b>
<b>3</b>			Localización geográfica		<b>1 - 5 - 6 - 8 - 14</b>
<b>4</b>			Factibilidad financiera		<b>7-14</b>
<b>5</b>			Mejorar la competitividad del puerto		<b>8</b>
<b>6</b>			Asegurar integración eficiente del puerto y de la ciudad		<b>3 - 5</b>
<b>7</b>			Políticas gubernamentales y tendencia		<b>14 - 6</b>
<b>8</b>			Estímulo al desarrollo ind. y oportunidades de trabajo		<b>5 - 14</b>
<b>9</b>			Ruido y contaminación del aire		<b>10 - 12</b>
<b>10</b>			Impacto en la ecología y en el paisaje		<b>9 - 12</b>
<b>11</b>			Compatibilidad con el patrimonio cultural e histórico		<b>8 - 14</b>
<b>12</b>			Dificultad de las tecnologías ingenieriles		<b>2 - 10</b>
<b>13</b>			Voluntad y cooperación pública		<b>2 - 8</b>
<b>14</b>			Coordinación con unidades relevantes		<b>1 - 7 - 8</b>
<b>15</b>			Factibilidad de cumplimentar las normas legales		<b>7 - 4 - 18</b>
<b>16</b>			Asegurar la seguridad general en el puerto		<b>18</b>
<b>17</b>			Comportamiento general para la capacidad de combate		<b>18</b>
<b>18</b>			Asegurar la seguridad de las naves de guerra		<b>17</b>

**Tabla 4.7** *Pesos para los criterios y veces que un criterio es parte de la solución*

					Cantidad de veces que un criterio forma parte de una solución (Del dual del problema)	Normalización columna de la izquierda	Pesos asignados a los criterios en Electre
<b>I.D.</b>	<b>Metas o criterios</b>						
<b>1</b>			Conveniencia para transporte externo		<b>2</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>
<b>2</b>			Espacios para requerimientos		<b>2</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>
<b>3</b>			Localización geográfica		<b>2</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>
<b>4</b>			Factibilidad financiera		<b>1</b>	<b>0.03</b>	<b>0.02</b>
<b>5</b>			Mejorar la competitividad del puerto		<b>3</b>	<b>0.08</b>	<b>0.21</b>
<b>6</b>			Asegurar integración eficiente del puerto y de la ciudad		<b>1</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>
<b>7</b>			Políticas gubernamentales y tendencia		<b>3</b>	<b>0.08</b>	<b>0.03</b>
<b>8</b>			Estímulo al desarrollo ind. y oportunidades de trabajo		<b>5</b>	<b>0.14</b>	<b>0.10</b>
<b>9</b>			Ruido y contaminación del aire		<b>2</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>
<b>10</b>			Impacto en la ecología y en el paisaje		<b>2</b>	<b>0.05</b>	<b>0.12</b>
<b>11</b>			Compatibilidad con el patrimonio cultural e histórico		<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.18</b>
<b>12</b>			Dificultad de las tecnologías ingenieriles		<b>3</b>	<b>0.08</b>	<b>0.01</b>
<b>13</b>			Voluntad y cooperación pública		<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>
<b>14</b>			Coordinación con unidades relevantes		<b>6</b>	<b>0.16</b>	<b>0.04</b>
<b>15</b>			Factibilidad de cumplimentar las normas legales		<b>0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>
<b>16</b>			Asegurar la seguridad general en el puerto		<b>1</b>	<b>0.03</b>	<b>0.02</b>
<b>17</b>			Comportamiento general para la capacidad de combate		<b>1</b>	<b>0.03</b>	<b>0.02</b>
<b>18</b>			Asegurar la seguridad de las naves de guerra		<b>3</b>	<b>0.08</b>	<b>0.02</b>

Interesa analizar si existe alguna clase de correlación entre ambos conjuntos de cifras, aunque sus significados sean distintos. Graficando en forma conjunta las cantidades de pesos asignados y los valores marginales, se obtiene la figura 4.1.



**Figura 4.1** Comparación gráfica del sentido de crecimiento y decrecimiento de pesos y frecuencia de aparición de criterios en las diferentes soluciones

#### 4.1.4 Análisis del resultado

Analizando el gráfico se comprueba que existe una concordancia en el sentido de crecimiento o decrecimiento de ambos valores en 15 criterios; es decir que un 83 % de los criterios varían en el mismo sentido considerando ambos sistemas de valoración, en tanto que hay 3 criterios que varían en sentido opuesto (los criterios 11, 12 y 13).

Esta alta concordancia en el sentido de variación de los criterios podría ser la causa del alto grado de concordancia que hay entre los dos métodos, como lo demuestran las ordenaciones de los autores y de Simus 1-2.

Variación en el mismo sentido: Criterios 1,2,3,4,5,6,7,8,9,12,14,15,16 y 17, o sea para el 78 % de los criterios,

Variación en sentido contrario: Criterios 11, 12, 13 y 14, o sea para el 22 % de los criterios.

Se observa una gran discrepancia de valores porcentuales para los criterios 5,11,12 y 18, o sea para el 22 % de los criterios.

Esta diferencia porcentual de '*intensidades de preferencia*' puede emplearse para comparar la valoración efectuada por los autores originales con los valores de importancia arrojados por Simus. Así, parecería que al criterio 5 se le ha asignado un peso elevado en comparación con el resto y lo mismo puede conjeturarse para los criterios 11 y 14. Sin pretender emitir ningún tipo de juicio sobre los motivos de estas

diferencias, se destaca que el modelo Simus podría quizás usarse como referencia para el cálculo de los pesos.

#### ***4.1.5 Conclusión de este ejemplo***

El ejemplo comentado ilustra el método Simus, al permitir abordar problemas con criterios y valores subjetivos y también con objetivos múltiples, empleando en forma reiterada el método Simplex de PL. Se ha ejemplificado el empleo y la versatilidad de Simus hallando la solución a un problema con 18 objetivos y que fuera resuelto por otra metodología. Los resultados muestran la equivalencia de las soluciones entre ambos métodos, y se ha llevado a cabo asimismo una discusión de los resultados.

El Módulo 4, es decir la incorporación de la condición de obtener la mayor cantidad posible de información de los datos originales, no se aplica a este caso ya que su propósito es fundamentalmente la selección de indicadores, ya sean ambientales, urbanos o de cualquier otro tipo. Para completar el tema se ha analizado la posible concordancia entre los valores porcentuales de los pesos asignados a los criterios por los autores originales del trabajo, y la cantidad porcentual de veces en que un criterio participa en una solución, y se ha comprobado que existe una concordancia elevada que se manifiesta por el sentido (aumento o disminución) en la variación porcentual de un criterio relativo a otros. Naturalmente, un solo ejemplo no es suficiente prueba de la bondad de una metodología, y por ello en la tabla 6.4 se aborda una comparación con 45 casos distintos resueltos por diferentes autores mediante diversos modelos.

## **CAPÍTULO 5            COMENTARIOS SOBRE ARTÍCULOS PUBLICADOS EN EL COMPENDIO**

Se comenta a continuación la naturaleza de los artículos publicados en revistas internacionales especializadas. De los tres artículos comentados, el primero y el tercero han sido publicados en revistas indexadas, en tanto que el segundo en una prestigiosa revista especializada.

### **5.1 Artículo publicado en ‘*Ecological Indicators*’ 11(2011) 1020-1026**

#### **Título:**

***Methodology to select a set of urban sustainability indicators to measure the state of the city, and performance assessment***

(Metodología para seleccionar un conjunto de indicadores urbanos sostenibles para medir el estado de una ciudad, y para evaluar su desempeño)

Autor: Nolberto Munier

#### **5.1.1 Descripción del problema**

Constituye una aplicación atípica de la PL, debido a las condiciones que exige el problema planteado. Se trata de un caso que plantea una temática compleja y que se soluciona aplicando el módulo 4 de Simus (Sección 3.4.5).

Hemos aplicado esta metodología a un problema real planteado por el Ministerio del Medio Ambiente de Canadá partiendo de varios cientos de indicadores ecológicos iniciales propuestos a fin de medir ciertos impactos. Para aclarar conceptos se define como impacto a una consecuencia que puede tener un proyecto, cuya intensidad puede o no medirse. Por su parte, un indicador se define como una métrica que tiene por objeto poner límites a ese impacto y además medir su evolución.

El objetivo de este trabajo fue determinar el cumplimiento de una serie de condiciones, a saber:

1) *Primera condición:* Diseñar un conjunto final manejable de indicadores clave, quizás entre un 15 y 20 por ciento del número original, a determinar a voluntad del centro decisor, y sujetos a que:

2) *Segunda condición:* Los indicadores se han de seleccionar en base a unos criterios definidos por el centro decisor y considerando si existe o no una pertenencia de los

indicadores a estos criterios, pertenencia ésta determinada mediante un consenso de expertos, y

3) *Tercera condición*: Que el conjunto de indicadores finales seleccionados concentre la mayor cantidad de información posible, a partir de los indicadores originales. Es decir, tratar de construir un conjunto de indicadores clave que incorpore la máxima cantidad posible de factores que afectan al medio ambiente, a fin de permitir su control.

A su vez, los indicadores están sujetos a criterios, que deben cumplir con el requisito de estar cada uno representado por una cantidad especificada mínima de indicadores, y que suele ser distinta en función de la importancia asignada a cada indicador por el centro decisor.

#### **5.1.2 Indicadores relacionados con los criterios de selección y estimación de su importancia absoluta**

- Para la primera condición, el centro decisor, de común acuerdo con los expertos, determinaron el número de indicadores finales deseados.
- Para la segunda condición, se reunió un grupo de expertos que evaluó cada indicador con respecto a cada criterio y determinó si existía o no una relación de pertenencia. Por ejemplo, es evidente que un indicador, tal como el número 9, '*Tasa de desempleo*', está directamente vinculado con criterios tales como '*Efectos inter-generacionales*', '*Desarrollo económico*' o '*Bienestar individual*', y no está relacionado con '*Vivir de los intereses*' (no se refiere a los intereses que devenga un capital sino a las producciones periódicas e indefinidas de aquellos bienes que se renuevan en forma continua, como el aire, agua, cosechas, pesca, etc.), ni tampoco hay vínculo por ejemplo con el '*Mínimo impacto en el medio ambiente*'. Cada relación de pertenencia se discutió y analizó entre las partes interesadas, y el resultado, expresado por la matriz de decisión (Tabla 5 del artículo), representó entonces un consenso.

Las diferentes categorías de criterios son:

- Criterios de sostenibilidad,
- Criterios generales de selección,
- Criterios relativos a las áreas de aplicación,
- Criterios inherentes al marco de la OCDE.

Por otro lado, y empleando el mismo procedimiento, todos los analistas asignaron a cada indicador un valor de importancia sobre una escala de 1 a 10 siguiendo un procedimiento que consistió en analizar mediante grafos las relaciones de carácter primario, secundario y terciario existentes. El peso se asignó en función de esas interrelaciones, a mayor valor mejor, teniendo en cuenta no sólo su importancia sino también su influencia sobre otros indicadores o sobre otros aspectos ambientales. Es decir se consideraron los posibles efectos secundarios o quizás paralelos, y además se tuvo en cuenta la cantidad de información que cada indicador puede aportar.



Por ejemplo, la cantidad de automóviles por habitante es un indicador relacionado con la contaminación del aire, con la congestión en las calles de la ciudad, con el consumo de combustible, etc. Este análisis se puede efectuar mediante un procedimiento de matrices encadenadas, procedimiento desarrollado en este trabajo (ver Sección 3.2.1), y debido al conocimiento de los expertos sobre el tema, y a los antecedentes existentes sobre los indicadores originales. La calificación final para cada indicador se obtuvo mediante un consenso promediado.

Cuando en la comparación se entendió que existía una relación directa entre un indicador y un criterio se asignó un '1' a la intersección de la columna (indicador) con la correspondiente fila (criterio). Cuando se completó este análisis de influencia o pertenencia se obtuvo la matriz de decisión de la tabla 5 del artículo y que reproduce aquí como figura 5.1. Es en realidad una matriz 0-1 y constituye la base de datos con el cual trabaja el método Simplex. Por razones tipográficas y de restricciones de espacio para la impresión del artículo por parte de la publicación, la parte de la matriz que corresponde a '*General selection criteria*', o sea '*Criterios generales de selección*', aparece vacía, pero en realidad esa submatriz, debería estar situada a la derecha de la matriz dibujada, como ocurre en la realidad. Sin embargo, la matriz completa puede observarse en la figura 5.1.

### **5.1.3 Criterios de selección**

Se consideran en este ejemplo 16 indicadores sujetos a 25 criterios, que se corresponden con las cuatro áreas siguientes:

- Metas sostenibles (*Sustainable targets*) (9),
- Criterios generales de selección (*General selection criteria*) (7),
- Áreas de aplicación (*Areas*) (6),
- Marco de referencia de la OCDE (*OECD framework*) (3).

Para cada criterio se estableció un umbral que respondía a la acción de '*mayor o igual que*' y que expresa que un criterio en particular debe estar representado, como mínimo, por una cantidad determinada de indicadores que impuso el analista, de acuerdo a lo que él consideró suficiente sobre la base de la importancia del criterio. Así, para un criterio significativo tal como '*Intergeneracional*' (*Inter-generation*) puede desearse que, como mínimo, haya dos indicadores que lo examinen. Lo mismo para otros criterios donde el centro decisor expresó por ejemplo: "*Para este criterio deben haber 4 indicadores*", para "*Este otro 3*" y así sucesivamente.

Esta restricción se impuso teniendo en cuenta lo que el centro decisor consideró más necesario e importante. Por otro lado, es posible y muy sencillo cambiar estos valores (ya que no están vinculados unos con otros, es decir no hay compensación al ser valores absolutos y no relativos), hallar nuevas entropías y resultados, y sobretodo conocer cuáles son los criterios importantes en función de los valores de las contribuciones

marginales (problema dual) de cada uno, y que aparecen en forma automática en cada solución del problema primal

Para ello se calculó la entropía de cada uno de los indicadores iniciales mediante su fórmula, y este valor, normalizado, se usó como coeficiente de la función objetivo. Los valores de la entropía para cada coeficiente se encuentran en la figura 5.1 en la fila '*Entropy*'. La entropía para todo el sistema, se indica en la misma fila, a la derecha y tiene un valor de 0,1038.

#### **5.1.4 La función objetivo**

El problema así planteado se resolvió por PL usando como función objetivo el maximizar la cantidad de información, es decir, corresponde a un caso mono-objetivo y, como tal, si el sistema tiene solución, se alcanza un óptimo de Pareto. El modelo se planteó en Excel<sup>®</sup>, se ejecutó mediante el método Simplex, y se empleó el software Solver<sup>®</sup>. El resultado arrojó no sólo un conjunto de indicadores que cumple con todas las restricciones impuestas, sino que además concentra la mayor cantidad de información que pueden suministrar los indicadores iniciales.

#### **5.1.5 Discusión del resultado de la metodología propuesta**

Hay varios aspectos que analizar con respecto a la validez y eficacia del método empleado.

El primero está relacionado con la obtención de la información que ha obedecido a la adopción de un procedimiento como es la consulta ponderada y consensuada de expertos, en lo referente a la calificación sobre el peso de cada indicador, y que es un método normalmente usado en este tipo de problemas.

El segundo aspecto se refiere a la construcción, siguiendo el mismo procedimiento, de la matriz de decisión, que en este caso es una matriz de pertenencia, y que si bien no garantiza que represente exactamente la realidad, provee en cambio una opinión consensuada sobre estas relaciones.

El tercer aspecto está relacionado con establecer una dependencia entre alternativas y criterios por medio de relaciones de '*mayor o igual que*', que es una norma corriente en PL, pero que en este problema postula que los términos de la derecha de las inecuaciones se fijen también por consenso, y que se determinen en función de la importancia directa e indirecta que posee cada criterio. Estos valores los fija el centro decisor en función de sus preferencias y de la importancia que atribuya a cada indicador, derivado de un grafo de Acciones – Efectos – Consecuencias (véase Sección 3.2.1).



El cuarto aspecto, tiene vinculación con el segundo arriba mencionado y que es la obtención de un resultado que contenga la mayor cantidad de información posible.

El empleo de la PL posibilita alcanzar una solución óptima del problema ya que sólo se trabaja con un objetivo que consiste en *'Maximizar la cantidad de información del sistema'* y, en consecuencia, no hay duda de que la solución alcanzada no sólo es factible y eficiente, sino que además es la mejor entre todas las soluciones eficientes posibles, de acuerdo, naturalmente con la exactitud de la información suministrada.

### **5.1.6 Elección del tamaño del conjunto seleccionado**

La cantidad final de indicadores es un tema que debe ser analizado cuidadosamente en función de los datos iniciales del problema y de la cantidad y magnitud de las restricciones o criterios. En el caso real (se recuerda que por las razones mencionadas el ejemplo del artículo es una abreviación del caso real), se adoptó el criterio o 'ley' de Pareto que, aplicado a este ejemplo, determina que aproximadamente el 20 % de los indicadores contiene el 80 % de la información. Sin embargo, en este ejemplo y considerando la cantidad de restricciones impuestas, se adoptó como medida del conjunto final, el 50% de los indicadores originales. Es decir, de 16 indicadores originales, se eligieron 8 para el conjunto final.

Veamos ahora qué sucede cuando se modifica la cantidad de indicadores del conjunto final. Si se aumenta progresivamente esta cantidad, en general, se incrementará la eficiencia del sistema, medida por el valor creciente de la función objetivo. Es evidente que si se empleara el 100 % de los indicadores iniciales - para lo cual lógicamente no haría falta este análisis ya que no habría selección- se presume que se obtiene la máxima cantidad de información.

Sin embargo, esta progresión no es lineal ni continua y puede suceder que, para ciertos tamaños del conjunto final, no haya una solución factible. Inversamente, se puede analizar qué sucede al disminuir la cantidad requerida de indicadores para el conjunto final, y se encontrará que se alcanza un límite por debajo del cual no existe una solución factible, lo cual es evidente, considerando que si se mantienen las restricciones originales debe existir forzosamente una cantidad mínima de indicadores para que se pueda satisfacer a todas ellas. En consecuencia, es posible obtener, con poco esfuerzo, una serie de valores finales y determinar, estudiando la curva de valores de la función objetivo, cual es la cifra más conveniente.

El análisis de sensibilidad puede también llevarse a cabo registrando los valores de la entropía del sistema, cuando se varían los coeficientes de importancia asignados a los indicadores originales. Si hay pequeñas diferencias entre ellos la entropía será grande, significando que la información que puede extraerse es pequeña. El mínimo de información (que corresponder a un máximo de la entropía), se alcanza cuando todos los indicadores tienen el mismo factor de importancia. Este hecho permite hacer nuevos planteamientos, que es lo más común, ya que el centro decisor suele querer saber "*¿Qué pasa si....?*" cuando en la solución final no se encuentran, por ejemplo, ciertos indicadores que hay interés en que aparezcan.

Contando con estos dos elementos de análisis, es decir el valor de la función objetivo y el valor de la entropía del sistema, éste mejorará cuando la función objetivo aumente y la entropía disminuya y viceversa.

#### **5.1.7 Otra versión del modelo**

Otra versión de este mismo modelo trata el caso en que no se quiere o no se puede estimar pesos de importancia para los indicadores originales y, en cambio, si se está en condiciones no sólo de determinar la relación de pertenencia sino también de asignar valores entre 1 y 10 a esa pertenencia en cada caso. Se procede de la misma manera en cuanto a la obtención de los datos, y la matriz de decisión reflejará entonces un conjunto de valores promedio. En ese caso puede aplicarse el módulo 1 de Simus. La función objetivo del problema consistirá, como anteriormente, en la maximización de la cantidad de información.

#### **5.1.8 Conclusión**

Como conclusión se estima que el método propuesto permite resolver un problema real y complejo al cual se enfrentan muchos organismos medioambientales. Se estima por otro lado que el método soluciona un problema para el cual no hay respuesta conocida al presente. Además, de acuerdo a la bibliografía consultada se entiende que ésta es la primera vez que se aplica el teorema de Shannon para garantizar, en este entono, que la solución contenga o refleje la máxima cantidad de información del sistema.

### **5.2 Artículo publicado en ‘Environment, Development and Sustainability’- Volume 8, Number 3, 425-443**

#### **Título**

***Economic growth and sustainable development: Could multicriteria analysis be used to solve this dichotomy?***

(Crecimiento económico y desarrollo sostenible: ¿Puede emplearse el análisis multicriterio para resolver esta dicotomía?).

#### **5.2.1 Antecedentes**

Se trata aquí de un tema que es visto por mucha gente como una dicotomía entre crecimiento económico y desarrollo sostenible, implicando que uno crece a expensas del otro y que, en consecuencia no puede haber coexistencia.

El objetivo de este trabajo fue demostrar lo contrario, ya que se estima que aunque enfrentados en muchas circunstancias, en realidad pueden y deben coexistir y la base para ello es encontrar un punto de equilibrio. El problema consiste en encontrar y nivelar los valores de intercambio (trade-offs) para poder comparar proyectos entre sí y llegar a una solución intermedia, satisfactoria, que reduzca a niveles razonables y

sostenibles los impactos sobre el medio ambiente y la sociedad y que, al mismo tiempo permita mantener el crecimiento económico

Como corolario fundamental, ello implica que en los análisis sobre proyectos deben participar el medio ambiente, la sociedad, y el desarrollo económico en igualdad de condiciones.

### ***5.2.2 Empleo de la Programación Lineal***

El propósito de este artículo es analizar esta aparente dicotomía y demostrar que existe una herramienta que puede aplicarse para determinar un punto de equilibrio y que es la Programación Matemática, y, en particular, la Programación Lineal (PL). Naturalmente, un argumento inmediato es que no todas las acciones son necesariamente lineales, y quizás la gran mayoría obedezcan a leyes no lineales. Sin embargo, ello no invalida dicho propósito ya que hay modos de descomponer esas funciones curvas en segmentos lineales y aplicar entonces las técnicas de PL en cada uno de ellos.

El tema radica entonces en incorporar a los proyectos de desarrollo económico aquellos criterios que estén relacionados con los impactos que producen (directos e indirectos), como pueden ser la contaminación del aire, del agua, del suelo, la generación de ruido, la extracción de áridos de los ríos, los perjuicios y beneficios a la sociedad, el aumento del ingreso por cada familia, la provisión de energía eléctrica a zonas marginadas etc., y lo que es más importante, considerar estos efectos en un pie de igualdad con los impactos económicos. El problema fundamental estriba en no permitir que el desarrollo económico prime sobre el aspecto ambiental y social; pero tampoco admitir que, en aras de conservar el medio ambiente, se produzca un deterioro de las condiciones de vida de la población, ni el estancamiento económico.

Se comenta este caso principalmente para indicar cómo encara el modelo el problema dado y para ilustrar el uso de uno de los módulos del método Simus, considerando que hay muchas restricciones de carácter cualitativo. Los grandes proyectos presentan en su mayoría un cierto número de alternativas de construcción generalmente referidas las diferentes rutas o trazados posibles. Por ejemplo, en un proyecto que se refiera a la construcción de una vía férrea de alta velocidad, deben considerarse los costes, junto con los beneficios económicos y sociales y perjuicios que cada ruta traerá a las poblaciones intermedias, incluyendo además el factor ecológico al atravesar ríos, zonas agrícolas, áreas protegidas, etc.

Estamos entonces ante un típico problema de PL en donde existen varias alternativas (las diferentes alternativas de trazado), cada una atravesando y beneficiando - o perjudicando - a determinadas poblaciones, y sujetas a una serie de condicionamientos, criterios o restricciones económicas, sociales y ambientales. Participan en consecuencia criterios cuantitativos como la longitud de cada trazado, el coste, el potencial de tráfico, etc., y otros subjetivos tales como el perjuicio económico ocasionado a áreas que quedarán sin este servicio ferroviario interurbano - que actualmente vincula una serie de aglomerados urbanos - la opinión de la población afectada, etc. El nuevo proyecto provocará asimismo una reducción de vuelos entre ambas ciudades (con los perjuicios

de pérdidas de empleos que ello conlleva), y la disminución de la circulación de miles de autobuses y turismos que actualmente circulan por la carretera que une a las dos ciudades, pero también la generación de miles de nuevos empleos, y la disminución en la importación de combustibles fósiles que el país no produce.

Como se aprecia, el problema es complicado por la cantidad de criterios impuestos, que pueden ser cientos, tanto sea cuantitativos como cualitativos y por la existencia de quizás más de un objetivo, aunque probablemente se podría considerar una función objetivo ‘evolvente’ que sería maximizar el empleo de los recursos nacionales (fondos, financiación, horas efectivamente trabajadas, uso de la tierra, fabricación de componentes para el proyecto, mano de obra durante la construcción y la operación del sistema, prestigio a nivel internacional, etc.).

Aquí se ha elegido como función objetivo la de minimizar el coste total del proyecto que, además está decir, es quizás el objetivo más importante, siempre y cuando ese coste represente no sólo el desembolso económico sino también el social y el ambiental. Generalmente, el coste social, en aspectos tales como los ocasionados por las externalidades no se considera en los proyectos, como tampoco las externalidades relacionadas con el medio ambiente.

La PL puede asistir con este problema tan complejo y en realidad su tratamiento guarda una cierta relación con la matriz de input.-output de relaciones interindustriales de Leontief (1951), cuya resolución se hace también por PL y con el método empleado por la Universidad Carnegie-Mellon (Eirola) de los EE. UU., para computar las toneladas de contaminantes que se arrojan a la atmosfera en todo proceso industrial. Nuestro caso es quizás un poco más complicado ya que no abarca sólo los beneficios sino también los perjuicios, y además los criterios cuantitativos y cualitativos.

Desde ese punto de vista podría considerarse una matriz que contemple efectos (positivos y negativos), y que debe tener en cuenta todas las interrelaciones (que lo hace, si los datos se calculan en forma correcta analizando las relaciones directas, indirectas e inducidas).

Veamos ahora el ejemplo propuesto en el artículo, que consiste en un problema urbano común, como es el de decidir cuál es la alternativa más apropiada para solucionar un problema de congestión de tránsito de vehículos. Este caso tiene cuatro alternativas que son excluyentes entre sí, aunque podrían no serlo, y que están sujetas a 14 criterios de selección. Estos criterios son una mezcla, como generalmente ocurre en casos reales, de valores cuantitativos y objetivos, y de criterios cualitativos y subjetivos.

En este caso se supone que el centro decisor optó por asignar pesos a los criterios - lo cual normalmente no es necesario en PL - y a pesar de que existían valores reales para los términos de la derecha de los criterios cuantitativos (volumen de tráfico, flujo de

tráfico, tráfico urbano, tráfico regional, beneficios económicos directos y beneficios económicos indirectos), se decidió no usarlos porque no se consideraron fiables. Por lo tanto, para asignar los valores a los términos de la derecha, se normalizó la matriz y se usó el primer módulo de Simus, tal como se observa en la tabla 4 del artículo. Queremos destacar que en aquellas restricciones de tipo '*Mayor o igual que*', se eligió como término independiente el menor valor de cada fila, en tanto que para las de '*Menor o igual que*', se escogió el mayor valor de cada fila.

A fin de tener en cuenta los costes ambientales y sociales y que se resaltan en cursiva en la tabla, estos costes se suman, normalizan y luego se agregan a los correspondientes costes económicos para cada alternativa. La cifra resultante es la que se emplea como coeficiente de cada alternativa en el funcional que pide minimizar los costes, y de esta manera quedan contemplados los costes económicos, los sociales y los ambientales.

### 5.2.3 Resultado

En este caso en particular no interesa tener un ordenamiento de proyectos sino de elegir sólo uno, que es también el caso más común. Para ello se instruye al modelo para que el resultado se exprese no sólo en números enteros sino además en valores del tipo 0 ó 1, o sea binarios.

Dado que no se desea tener un ordenamiento de proyectos sino elegir sólo uno, el valor debe estar expresado en números enteros: no tendría sentido decir, por ejemplo, que la solución es de 4,78 para, digamos, la alternativa C. Pero, por otro lado, tampoco tendría sentido obtener un valor tal como 4 ó 5. Por ese motivo se instruye también al modelo para que la solución esté expresada en forma binaria, sea decir '1' para ejecutar una alternativa, y '0' para no considerarla. De esa manera es que se obtiene como solución, que la mejor alternativa es la A (tabla 4 del artículo). Es de destacar que el Solver, puede resolver problemas lineales y de programación lineal entera, aunque ambos estén presentes simultáneamente en el mismo caso, que es lo que sucede en este ejemplo.

### 5.2.4 Análisis del resultado

Queremos destacar que la alternativa elegida por el modelo, la A, no es ni la más económica ni tampoco la que menor impacto ambiental produce. El modelo la escogió porque es la solución de compromiso y constituye el punto de equilibrio entre el crecimiento económico y el desarrollo sostenible, del cual se habla más arriba.

En el ejemplo se determina además una ratio entre costes económicos y ambientales (tabla 5). Obsérvese que para la alternativa elegida ese ratio es de 0,96, muy próximo a 1, es decir a tener igualdad de costes.

Naturalmente, se comprende que la realidad es mucho más compleja que el caso elemental descrito, pero es evidente que la técnica, aplicada a grandes proyectos de desarrollo económico tales como la construcción de fabricas de papel, de aluminio, de acero, carreteras, presas hidroeléctricas, etc., cuando se analizan contemplando, tanto



los beneficios económicos como los sociales y los perjuicios que se ocasiona al medio ambiente, es capaz de encontrar una solución equilibrada.

### **5.3 Artículo publicado en ‘Renewable Energy’ 29 (2002) 1775-1791**

#### **Título:**

***Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources (Elsevier)***

(Herramientas multicriterio para la toma de decisiones para ayudar a las comunidades a priorizar fuentes factibles de energía renovable)

Autores: K. Nigim, N. Munier, J. Green

#### **5.3.1 Antecedentes**

El trabajo, desarrollado en la región de Kitchener –Waterloo, provincia de Ontario, en Canadá, buscó determinar las fuentes de energía renovables más convenientes. El hecho de tener que decidir sobre cuál de las fuentes renovables seleccionar, y que estén sujetas a una serie de condicionamientos, lo convierte en un problema de toma de decisiones. Se utilizaron aquí dos herramientas de decisión, el método AHP y el método Simus.

#### **5.3.2 Resolución mediante el empleo de los módulos de Simus**

En el caso propuesto en este artículo se aplicó el primer módulo. Fue una de las primeras aplicaciones comparadas de Simus y se llevó a cabo para demostrar que la PL puede también abordar problemas con criterios cualitativos, por lo tanto se trató de comprobar si partiendo de los mismos datos, su comparación con otro método conducía a resultados equivalentes. Ello probaría la eficacia de Simus y, a la vez, demostraría la equivalencia entre modelos. El problema se abordó por dos grupos de trabajo usando respectivamente AHP y Simus, trabajando independientemente, y posteriormente se cotejaron los resultados obtenidos.

#### **5.3.3 Planteamiento del problema**

Como alternativas se consideraron las siguientes cinco opciones:

- A. Térmica solar,
- B. Fotovoltaica,
- C. Térmica del suelo,
- D. Eólica,
- E. Mini turbinas hidráulicas.

El detalle y el alcance de cada una de estas alternativas se explican en el artículo, por lo cual no se repiten aquí.

Los criterios para la selección fueron los siguientes:

- a) Disponibilidad del recurso,
- b) Impacto ecológico,
- c) Factibilidad técnica,
- d) Factibilidad financiera,
- e) Potencial educativo,
- f) Beneficios socio económicos.

Como se aprecia hay un criterio cuantitativo (a), ya que se conoce, por estudios anteriores, el potencial de cada alternativa, siendo el resto de los criterios de naturaleza cualitativa. La información base que permitió construir la matriz de decisión provino, como se explica en el artículo, de expertos y a la vez de fuentes federales.

#### 5.3.3.1 Resultado del grupo AHP

Este grupo llegó a obtener los siguientes valores (a mayor valor, más alta prioridad) (tabla 5.1):

**Tabla 5.1** *Valores prioritarios obtenidos con el método AHP*

Alternativas o fuentes	Tipo de fuente	Prioridad
A	Térmica solar	0,229
B	Fotovoltaica	0,205
C	Térmica del suelo	0,180
D	Eólica	0,217
E	Mini turbinas hidráulicas	0,169

El ordenamiento fue por lo tanto:

**A – D – B – C – E**

#### 5.3.3.2 Resultado del grupo SIMUS

Este grupo llegó a obtener los siguientes valores (a mayor valor, más alta la prioridad) (tabla 5.2):

**Tabla 5.2** *Valores obtenidos con el método Simus*

Alternativas o fuentes	Tipo de fuente	Prioridad
A	Térmica solar	0.224
B	Fotovoltaica	0,206
C	Térmica del suelo	0,184

D	Eólica	0,213
E	Mini turbinas hidráulicas	0,172

El ordenamiento fue por lo tanto:

$$\mathbf{A - D - B - C - E}$$

Es decir, se ha obtenido un ordenamiento coincidente en los dos modelos.

Hay que considerar que, si bien ambos modelos parten de la misma base de datos, que es la generada por AHP para los coeficientes de las alternativas, a partir de ese punto ambos se desarrollan por caminos totalmente distintos.

AHP procede a multiplicar la valoración obtenida de cada alternativa, en función de cada criterio, por el correspondiente peso de dicho criterio, que fue derivado a su vez de una comparación pareada de los criterios, o sea es una agregación aditiva ponderada. Luego, la prioridad de cada alternativa se computa mediante la suma de esos productos.

Simus procede en cambio a hallar los valores factibles y eficientes en los vértices del politopo que se genera cuando se consideran todos los criterios, y escoge, como solución óptima aquel vértice que es tangente a la función objetivo, que en este caso corresponde a maximizar el empleo de las fuentes renovables, y que produce los valores indicados, y por ende su ordenamiento.

#### *5.3.3.3 Discusión de resultados de este caso*

Este resultado parece corroborar la teoría mantenida por varios investigadores y nosotros mismos, tal como se comenta en la sección 2.9, de que todos los modelos aplicados a un mismo problema, teniendo en vista el mismo objetivo y empleando técnicas matemáticas - aunque éstas sean diferentes - deben producir resultados equivalentes. En este ejemplo, el centro decisor utilizó el método AHP para asignar pesos a los criterios.

Resumiendo, se puede concluir en que hay al menos indicios de que la metodología desarrollada por Simus es adecuada, especialmente en su ordenamiento cuando existen una gran cantidad de combinaciones posibles.

Por otro lado, un solo ejemplo que muestre coincidencia de resultados no faculta hacer una declaración taxativa de equivalencia; por este motivo, en este trabajo se detalla la contrastación realizada con una gran cantidad de ejemplos reales, elaborados y resueltos por investigadores de todo el mundo, y los resultados alcanzados, apoyan la hipótesis de equivalencia (Véase tabla 6.4, Sección 6.4, Capítulo 6).

Hay otro aspecto a considerar, ya que se ha asumido a priori y en ambos métodos que todas las alternativas poseen la misma importancia, que queda expresada por el mismo peso, circunstancia ésta que si bien es factible, no es sin embargo probable. Es posible en cambio asignar diversos coeficientes de importancia a las alternativas, sobre la base

de las características técnicas y operativas de cada una. Por ejemplo, todas ellas, excepto la C tienen restricciones de continuidad de generación de energía. La A y la B, se pueden aprovechar sólo de día (aunque es también posible generar en las primeras horas del anochecer si se almacena energía térmica con dispositivos adecuados, y se la libera después de la puesta del sol); por otro lado también dependen de la latitud y de la época del año.

La alternativa D es función de los vientos predominantes que suelen soplar con diferentes intensidades a lo largo del año y en determinadas horas, y la alternativa E está supeditada a las estaciones, la época de lluvias y a los deshielos. En cambio, la alternativa C, la *Térmica del Suelo*, utiliza la energía térmica solar almacenada en el subsuelo y que en una región determinada se mantiene prácticamente constante durante todo el año. Esto naturalmente provoca que esta alternativa tenga una mayor importancia que las restantes puesto que la energía puede ser extraída en cualquier momento, en forma permanente, y en cualquier estación del año.

El hecho de que ambos modelos hayan colocado en primer lugar a la Térmica del Suelo, y en segundo lugar a la Eólica, que es ciertamente más constante que las restantes y que no depende de las horas de sol, parece confirmar nuevamente que la comparación pareada que dio origen a la matriz de decisión, efectivamente tuvo en cuenta estos factores. Esta conclusión se basa en que cuando se comparan por ejemplo, la Térmica Solar con la Fotovoltaica en función de un criterio como la disponibilidad del recurso, es razonable que ambas tengan el mismo valor ya que dependen de la misma fuente, y eso se refleja en los valores de la tabla 5 del artículo.

Como conclusión, se entiende que este análisis de fuentes no convencionales de energía, si bien simple, puede dar resultados muy útiles cuando se aplican técnicas para la toma de decisiones. Naturalmente, es necesario alimentar a los modelos con los datos más exactos posibles para que los resultados sean los correctos, aunque hay que reconocer también que a veces las preferencias del centro decisor tienen peso, ya que él puede cuestionar si una pequeña diferencia en valores o en atributos, hace más preferible a priori o a posteriori una alternativa sobre otra.

## **CAPÍTULO 6    ANÁLISIS DE RESULTADOS, REFLEXIONES Y CONCLUSIONES**

### **6.1 Consideraciones generales**

La presente tesis propone un modelo heurístico alternativo para la toma de decisiones en proyectos, aun considerando que existen más de una docena de métodos que emplean diferentes metodologías, asunciones y procedimientos. ¿Cuál es entonces la lógica de formular un nuevo procedimiento? La razón estriba en que ninguno de ellos, incluido Simus, puede garantizar que se alcance la mejor solución, aunque a veces ésta no es la deseable, requerida u obtenible.

No obstante, es obvio que la PL debido a su estructura matemática permite modelar el problema con una mayor aproximación - aunque desde ya sin representarlo en forma fidedigna - y a la vez admite considerar las preferencias, opiniones e intereses de las personas o grupos que han de decidir. Situaciones que son comunes en proyectos de gran complejidad, como es el planeamiento de una cuenca hídrica y resuelto aplicando la PL (Véase Cohon, 1978), avalan esta afirmación. Sin embargo, el hecho de que en estos escenarios existen siempre criterios cualitativos y que normalmente aspiran a objetivos múltiples, puede haber conspirado para extender el empleo más amplio de la PL. Se estima que la contribución de Simus al tratar de complementar la PL en lo referente a estos dos aspectos, la convierte en una herramienta aun más poderosa de lo que es, al permitir usar la PL en un ámbito en el cual hasta ahora no se ha utilizado.

Es cierto también que en el planteo y resolución de un problema de toma de decisión por PL hay presentes subjetividades, las cuales son ineludibles en cualquier proyecto que implique diferentes alternativas, siendo quizás la primera de ellas el decidir sobre la cantidad y naturaleza de los criterios a aplicar, como así también en el establecimiento de los coeficientes de una restricción cualitativa, aspectos estos que son comunes a todos los métodos existentes. En este punto la PL presenta la ventaja de no depender de las preferencias del centro decisor, ni de necesitar umbrales de aceptación para los criterios o de elegir una métrica.

No obstante, aun para determinar algo subjetivo como es la fijación de la cantidad y tipo de restricciones a considerar, Simus propone el empleo de algunas herramientas que si bien no eliminan la subjetividad, al menos la acotan, cuando se emplean grafos o las

matrices escalonadas (Véase Sección 3.2.1); naturalmente estas herramientas también pueden ser empleadas por los otros métodos. El tratamiento de la incertidumbre y riesgos, algo siempre presente, también puede manejarse con Simus ya que son generalmente restricciones cualitativas y que imponen el trabajar con probabilidades.

A fin de aclarar conceptos, es necesario mencionar que los métodos existentes tratan todos los objetivos en forma simultánea en tanto que Simus los trata *ceteris paribus*, es decir optimizando cada uno de ellos, mientras los demás se mantienen como restricciones o metas, lo cual se lleva a cabo en la primera parte del método. Este procedimiento genera una matriz de resultados eficientes, que puede considerarse una matriz de decisión, pero con la diferencia de que todos los valores o coeficientes son óptimos. Tomando como base esta matriz Simus aplica un algoritmo que analiza todos los objetivos en forma simultánea y sin necesidad de asignarles pesos - aunque si así se desea no hay inconveniente en hacerlo. De esta manera Simus se une a los métodos existentes que tratan a todos los objetivos a la vez.

## 6.2 Análisis de las soluciones

Desde el punto de vista de la solución o soluciones alcanzadas por Simus hay que considerar que:

1. En las situaciones a examinar no siempre es posible llegar a una solución óptima sino a una que satisfaga a la mayoría de los participantes y que contemple sus ideas, sugerencias y conocimientos sobre un tema en particular. Por otro lado muchas veces no interesa tanto el paradigma optimizador sino el satisfaciente, lo cual es comprensible, porque no hay ningún método, matemático o no, que puede reemplazar al razonamiento humano. Este resultado satisfaciente es el que se alcanza con los modelos existentes y es también el resultado que ofrece Simus.
2. La técnica PL/Simus arroja resultados óptimos cuando se consideran casos con un solo objetivo, salvo en algunos desarrollos, tales como la '*Programación por Metas*' (Goal Programming) (Véase Romero, 1991), en los cuales se puede introducir más de un objetivo, pero que también requiere de apreciaciones subjetivas en la determinación de los desvíos aceptables por parte del centro decisor o del analista.
3. En ciertos proyectos se necesita que la solución sea no un ordenamiento de proyectos o de alternativas, sino que indique claramente cual, de entre todas las alternativas, es la 'mejor'. Es decir se requiere un resultado binario del tipo '1' individualizar un proyecto o proyectos y rechazar otros, indicándolos con '0'. El método PL/Simus puede producir esos resultados.

## 6.3 Contrastación de resultados

Todos los modelos existentes - excepto la PL monoobjetivo y en casos la Programación por metas - arrojan resultados cuyo grado de exactitud no puede determinarse, al no existir o conocer cuál sería la solución ideal, y Simus no es la excepción. ¿Cómo puede

entonces comprobarse que se alcancen resultados satisfactorios? Una forma es plantear un caso en particular, resolverlo mediante diferentes métodos, y luego comparar los resultados alcanzados.

Si estos coinciden o están muy cercanos, es factible suponer que el resultado hallado es el más satisfactorio de entre todos los posibles. Por lo tanto, es interesante efectuar para un problema dado un contraste entre los diferentes métodos, y eso es lo que se ha hecho en esta tesis, al contrastar los resultados de Simus con los de varios métodos, resueltos por distintos investigadores, y para diversos problemas, situaciones y áreas, abarcando un total de 45 casos.

De acuerdo a la bibliografía consultada sobre cada problema se presentan diversos casos a saber:

- a) Emplean un modelo determinado, por ejemplo, Maut,
- b) Utilizan variaciones de un modelo determinado, por ejemplo usan Promethee I y III, Regime AHP y con VISA,
- c) No se indica el modelo empleado.

Sin embargo, y como un común denominador, se emplea Simus en todos los casos, o sea se compara este último contra todos los modelos y situaciones, lo cual suministra una amplia gama de comparación.

¿Cómo se ha efectuado la comparación?

Se ha adoptado el siguiente criterio:

- 1) Completa coincidencia perfecta con Simus en el ordenamiento proveniente de un modelo en particular - evidentemente la situación mas difícil - considerando que la cantidad de soluciones posibles para un caso digamos de 8 proyectos o alternativas es de  $8! = 40320$  combinaciones posibles,
- 2) Coincidencia en el ordenamiento de los dos primeros proyectos o alternativas,
- 3) Coincidencia sólo en la selección de la primera alternativa,
- 4) Sin coincidencia apreciable.

En todos los casos se asume que los resultados alcanzados por los autores son los 'adecuados o correctos' y que entonces corresponde a Simus emularlos. Por lo tanto, si no hay coincidencia, esta discrepancia se atribuye a Simus por cualquier motivo que sea.

Es indudable que esta condición dura no favorece a Simus, dado que también puede haber habido inconvenientes o quizás un inadecuado planteamiento en el modelo heurístico utilizado; sin embargo, se mantiene esta postura dado que es necesaria para poder comparar resultados. Por otro lado, es evidente que el o los autores originales en cada caso han contado con un nivel y calidad de información que los

autores de esta tesis no conocen ya que han trabajado sólo con los datos proporcionados en los respectivos artículos.

Los resultados de la contrastación se muestran en la tabla 6.4, y el resumen en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1 Porcentajes de coincidencia en los resultados**

	Cantidad de casos	Porcentaje parcial	Porcentaje acumulado
Completa coincidencia en el ordenamiento de las alternativas	19	42,2	<b>42,2</b>
Coincidencia en las dos primeras alternativas	8	17,7	<b>59,9</b>
Coincidencia solo en la primera alternativa	13	28,8	<b>88,7</b>
Sin coincidencia	5	11,1	100

De aquí, se desprende que:

1. Se llega a una coincidencia acumulada del 88,7 % lo cual se considera una demostración heurística evidente de que el modelo Simus puede resolver los mismos tipos de problemas que los modelos existentes.
2. Es interesante verificar además que el caso más difícil de concordancia - que es evidentemente obtener una coincidencia total de ordenamiento, dada la múltiple posibilidad de combinaciones posibles - es precisamente el que obtiene un porcentaje más alto (42,2 %).

Aun siendo elevada, esta concordancia perfecta es en realidad mayor, dado que en el cómputo anterior no se consideró el proyecto número 28 que arroja una concordancia perfecta para  $q = 0,20$ . Esto se debe a que, debido a la estabilidad que se aprecia a partir de  $q \geq 0,30$  se consideraron sólo los ordenamientos correspondientes a estos últimos 'q' y que difieren muy levemente. En caso de considerar también este proyecto como de coincidencia perfecta, el porcentaje anterior se eleva al 44,4 %. Es evidente que estos valores excluyen toda presunción de que estas coincidencias se deban al azar.

Los resultados de esta comparación, expresados en forma cuantitativa, están en línea, refuerzan y confirman lo expresado en la Sección 1.2 cuando se habló sobre los objetivos de este trabajo. Estas conclusiones se consideran importantes, pues no se refieren a un caso sino a una cantidad significativa de casos, y porque abarcan una amplia gama de actividades como se aprecia en la tabla 6.4. Por otro lado se comparan los resultados alcanzados por modelos distintos, sobre problemas diferentes, y todos ellos en forma individual, versus Simus.

#### **6.4 Comentarios sobre la resolución de los casos**

La investigación llevada a cabo abarcó 45 casos reales, con información procedente de diversas fuentes que incluyeron: Contacto personal y por correspondencia con autores, libros, artículos, e Internet. En algunos casos hubo discusión con los respectivos autores



y en todos los casos los mismos manifestaron su aprobación del método Simus que se aplicó a sus proyectos. La tabla 6.2 muestra un desglose de los modelos empleados en dichos casos.

**Tabla 6.2**      *Modelos empleados y cantidad de  
problemas resueltos por cada uno*

<b>Modelo empleado</b>	<b>Cantidad de proyectos resueltos por cada modelo</b>
AHP	11
Coste/Beneficio	2
Desconocido	1
Electre	10
GIS	1
Maut	4
Programación por metas	1
Promethee	8
Regime	2
Sami	2
Simulación y Visa	1
Simus	45
Suma ponderada	1
Topsis	1

Los proyectos estudiados están agrupados de acuerdo a los siguientes 11 sectores y que se muestran en la tabla 6.3, como así también la cantidad de proyectos por sector.

**Tabla 6.3**      *Sectores a que pertenecen los proyectos  
y cantidad de proyectos por sector*

<b>Sectores</b>	<b>Cantidad de proyectos</b>
Infraestructura	11
Varios	7
Generación y distribución eléctrica	7
Medioambientales	4
Agrícolas	3
Localización industrial y distribución	3
Actividades industriales	3
Gestión de residuos sólidos	2
Planeamiento económico	2
Gobierno	2
Viviendas	1

La tabla 6.4 detalla todos estos casos y suministra la siguiente información en cada columna:

Columna 1: Número de identificación de cada proyecto

Columna 2: Área a la que pertenece el proyecto y de acuerdo a lo detallado en tabla 6.3.

Columna 3: Tipo de proyecto,

Columna 4: Componentes del proyecto, es decir cantidad de alternativas y de criterios,

Columna 5: Modelo/s empleado/s por los respectivos autores,

Columna 6: Resultado alcanzado por los autores,

Columna 7: Resultados alcanzados por el método de PL/Simus, empleando los módulos (1) ó (1 y 2) en conjunto,

Columna 8: Comparación de resultados de acuerdo a los criterios comentados en la Sección 6.3.

Observar que en las columnas 7 y 8 se han colocado para cada caso los ordenamientos completos. Se han subrayado las alternativas en donde hay coincidencia de resultados con Simus, y de acuerdo a lo mencionado en la Sección 6.3. Así, para el proyecto numero 01 se verifica que sólo hay coincidencia en la primera alternativa, que es la P3. En el proyecto 03 sólo hay coincidencia en las dos primeras alternativas A y C, etc.

#### **6.4.1 Interpretaciones sobre algunos casos analizados y su resolución por LP/Simus** (La numeración de los proyectos no sigue un orden natural ya que están ordenados por áreas de actividad)

##### **Comentario sobre el caso 23 (Localización industrial y distribución, Polonia)**

Los autores resuelven este problema empleando AHP y Electre. Su resolución por Simus muestra que hay acuerdo en la elección de la primera alternativa y discrepancia con respecto a la segunda y tercera, pero las alternativas elegidas coinciden con la de los autores. Hay que tener en cuenta que estos no especifican qué es deseable desde el punto de vista de la compañía sobre una serie de criterios que tuvieron que ser asumidos al aplicar Simus y que se basaron en cierta lógica operativa. Por ejemplo, se desconoce si la compañía desea tener depósitos propios o no, si aspira a tener su propio transporte o a contratarlo, etc. En consecuencia es razonable esperar que de haber tenido toda la información disponible, Simus hubiera alcanzado el mismo ordenamiento que los autores.

##### **Comentario sobre el caso 13 (Construcción de centrales hidráulicas, Nepal)**

No se conoce el modelo empleado por los autores aunque se presume que haya sido Maut o Coste/Beneficio.

Es indudable la complejidad de este proyecto, y aunque se desconocen las técnicas de análisis que emplearon las compañías consultoras Acres y SNC Lavalin, ambas de Canadá, y responsables del estudio, es obvio que se hizo un análisis profundo y que las conclusiones a que arribaron - que se detallan en la correspondiente resolución por Simus - indican un estudio concienzudo en cada sitio no sólo de las condiciones geológicas, hidrográficas y sociales sino también de las ambientales. Apoyado en los datos suministrados por este estudio se aplicó la metodología Simus, y aunque no se pretende haber resuelto de esta manera un problema muy complejo, es evidente que la metodología detectó y señaló los mismos proyectos a que arribaron los consultores. El mayor mérito sin embargo no es del modelo, sino de la voluminosa y precisa

información y datos recogidos y elaborados por los consultores, cualquiera que hayan sido las técnicas empleadas.

#### **Comentario sobre el caso 26 (Construcción de una línea de alta tensión, Sud África)**

Los autores emplearon el método GIS para su resolución. Este es un caso complejo, no por sus 8 alternativas y 19 criterios, sino debido a la necesidad de optimizar tres rutas, la correspondiente al primer tramo entre las poblaciones A y B, la del segundo tramo, entre B y C, y el tercer tramo, entre A y C, y con diversas opciones para cada tramo. Para su resolución por Simus se duplican los criterios, o mejor dicho cada atributo figura dos veces, ya que está acotado en su valor mínimo y máximo. Por otro lado, los criterios abarcan una gran variedad de aspectos tales como poblaciones, cultivos, ríos a atravesar, rutas a cruzar, pendientes de los terrenos, condiciones de distancia a las granjas y a los pueblos etc. Es de hacer notar que se envió este problema - resuelto por Simus - a los autores, quienes respondieron entusiastamente dado que los resultados alcanzados por este método coinciden con los de ellos.

#### **Comentario sobre el caso 11 (Importación de energía eléctrica, Noruega)**

Originariamente resuelto por su autor con una combinación de AHP y Maut.

Este ejemplo es muy interesante porque analiza cómo distribuir la energía generada, ya sea térmica o eléctrica o ambas. Lo que lo hace más relevante es el propósito ecológico del estudio ya que considera emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Esto no es por supuesto nada nuevo, pero lo que se resalta aquí es que Noruega, un país cuya economía está basada fundamentalmente en la producción de energía eléctrica debido a las muchas fuentes hidroeléctricas que posee, debe importar el fluido de otros países y lo que el ejemplo analiza es cuál será la contaminación que se producirá en *los países donde se genera la energía*, no en Noruega, debido a que los primeros pueden producir energía a partir de combustibles fósiles. Cuando se lo resolvió con Simus el resultado arrojado por este método coincidió en la identificación de la primera alternativa, que es también la obtenida por las dos versiones de AHP empleadas.

#### **Comentario sobre el caso 66 (Selección de fuentes no tradicionales para generación de energía eléctrica, Italia)**

El Autor desarrolla su análisis empleando el método Promethee y encuentra tres resultados, ya sea que se considere el sistema completo, o con orientación técnico-económica o con orientación medioambiental. De esos tres halla concordancia en dos de ellos. En este caso el Autor emplea tres tipos de pesos para los criterios que son:  $\alpha$ , que hace igual a 1 para todos los criterios,  $\beta$ , que corresponde al escenario orientado a la economía y  $\gamma$ , correspondiente al área social y de medioambiente. Al resolverlo por Simus se llega a coincidir con el segundo escenario. Hay que tener en cuenta además que se desconoce qué tipo o tipos de funciones de preferencia empleó el

Autor, y bien pudiera ocurrir que un cambio en esa elección haga coincidir en forma total el ordenamiento de Promethee con el de Simus.

### **Comentario sobre el caso 25 (Protección de cultivos, EE.UU.)**

El Autor empleó el método AHP y también se llevó a cabo su resolución por Simus.

Es un caso sencillo, pero se lo comenta para demostrar la versatilidad de Simus en un proyecto que es totalmente de naturaleza cualitativa, alcanzándose el mismo resultado.

### **Comentario sobre el caso 39 (Investigación agrícola - ganadera, Ucrania)**

Los autores originales lo resuelven empleando AHP. Si se extrae una de las restricciones, la más obvia - que es el valor de la producción y se la maximiza - Simus obtiene como resultado elegir la producción de carne de cerdo, que es la misma solución de los autores.

Dado que en este método los valores cuantitativos se agrupan en intervalos y en función de que a cada intervalo se le asigna un valor cardinal en una escala dada, se comprende que los resultados no sean exactos. Este proyecto es interesante por varios motivos:

1. Si bien es cierto que no hay una concordancia perfecta en cuanto a ordenamiento hay que tener en cuenta que los autores emplean para los criterios rangos de valores para cada uno y luego asignan un valor cardinal en una escala arbitraria a cada rango. Por supuesto esto es perfectamente permisible, sin embargo, esto hace que se trabaje con valores que no son exactos sino que están dentro de un cierto rango y se asume la valoración del rango como la contribución de cada alternativa correspondiente a cada criterio. Simus trabaja en cambio con los valores cuantitativos exactos por lo que se presume que el resultado también lo es. Esta circunstancia puede explicar la discrepancia en el ordenamiento al emplear ambos métodos.
2. La resolución mediante PL de este problema, además de identificar el ordenamiento ofrece la información de los valores marginales o precios sombra para algunos criterios, es decir, indica cuanto varía la función objetivo, que en este caso es el valor de la producción anual en millones de Euros. De esa manera es posible determinar la importancia de cada criterio, ya que lógicamente será más importante aquel que produzca el máximo aumento al funcional. En nuestro caso, el criterio más importante es la conservación de agua, y el aumento de una unidad en la valoración mínima implica un crecimiento del funcional.

### **Comentario sobre el caso 41 (Uso sostenible de la tierra, Grecia)**

Este caso ha sido originariamente resuelto empleando el modelo Regime.

Es interesante destacar que los autores trabajaron exclusivamente con valores cualitativos pero sin dar la equivalencia cardinal. Para resolver este caso, Simus se apoya en los conceptos cualitativos y los convierte en cardinales mediante una sencilla tabla de equivalencias, que más que probablemente difiere de la que emplearon los autores, ya que ésta se desconoce; sin embargo se alcanza el mismo resultado.

**Comentario sobre el caso 15 (Selección de inversiones, Rumania)**

El trabajo original fue resuelto por sus autores con Electre en sus diferentes versiones I, II, IV y Modificado, y encuentra diferentes soluciones para cada una de dichas versiones no registrándose en consecuencia coincidencias entre ellas en cuanto al ordenamiento. Resuelto el problema por Simus, éste encuentra una solución en la cual la primera alternativa no coincide con ninguna versión de Electre I.

**Comentario sobre el caso 67 (Sostenibilidad urbana, Europa)**

El Autor usa el método Maut y comenta que hay mucha incertidumbre en los datos, y opina que *“Todas estas incertidumbres tienen que considerarse cuando se especifica que una ciudad es mejor que otra”* y agrega *“Esta incertidumbre es ignorada completamente por la regla de agregación lineal”*. Cuando el problema se resuelve por Simus éste encuentra una solución en la cual coinciden las dos primeras alternativas y con una inversión de ordenamiento de las dos últimas.

**Comentario sobre el caso 27 (Minería, Turquía)**

Los Autores emplean el método Promethee y cuando se compara con el resultado de Simus éste es sólo aproximado, ya que asigna al primer lugar una alternativa que Promethee afecta al segundo lugar. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los autores utilizaron pesos para los criterios que fueron determinados en forma subjetiva por los gerentes de las diversas aéreas, en tanto que Simus no empleó ningún peso. Repitiendo el análisis con Simus pero considerando los pesos de los autores, los resultados de ambos métodos coinciden.

**Comentario sobre el caso 65 (Medios de comunicación, EE.UU.)**

Como se aprecia, hay coincidencia en la primera selección ya que el ordenamiento es completamente dispar. Este ejemplo es interesante ya que el autor original hace un análisis cambiando los pesos y obtiene la misma primera selección pero con un ordenamiento totalmente distinto, lo cual evidencia que la elección depende del peso que se asigne a los criterios y como estos son subjetivos, muestra en este caso que la solución, si bien es estable al seleccionar la misma alternativa, esa estabilidad no se refleja en el ordenamiento. Simus provee también, como se ha visto, un ordenamiento diferente, y podemos determinar la estabilidad de la solución mediante el cambio de algunos parámetros para analizar los resultados. En este caso se le pide al modelo que entregue una solución con la condición de que se haga un ordenamiento total, es decir abarcando todas las alternativas; el modelo la hace (solución 1), y el resultado sigue siendo el mismo. Se pide luego que se haga un ordenamiento considerando sólo algunas alternativas (solución 2) y la solución sigue igual. Por último puede pedírsele que aplique PL pura, y la misma selección continúa, lo cual muestra que ésta es muy estable. Es decir, para este caso en particular hay una estabilidad manifiesta en el ordenamiento hallado por Simus, que no se verifica con Promethee.

**Comentario sobre el caso 46 (Industria automovilística, Austria)**

Este caso muestra una aplicación poco común de las técnicas multicriterio, pero lo que realmente atrae y es importante, es que se elige un procedimiento de pintura base en forma de dañar lo menos posible al medio ambiente y empleando el concepto de ‘Evaluación Técnica Integrada’, exigido por el Concejo de la Unión Europea. Como se aprecia en los resultados, Simus selecciona la misma primera alternativa que Promethee aunque hay un ordenamiento dispar entre ambos métodos, que puede ser quizás debido a la subjetividad en la elección de las funciones de preferencia en el método Promethee. Por otro lado hay que mencionar que la resolución del problema mediante Simus implica hacer asunciones sobre su naturaleza que nos son desconocidas ya que no están explicitados en la literatura provista.

Por lo tanto, se puede llegar a deducir que en un caso en donde los investigadores tengan un conocimiento cabal del problema y estén de acuerdo en los principales parámetros (por ejemplo que hay que minimizar y maximizar respectivamente) es de esperar que el empleo de Simus arroje resultados aun más exactos. Para resolver este problema en Simus se extrajo una de las restricciones del problema - la correspondiente a los costes - y se la empleó como función objetivo, minimizándola. Coincidentemente se observa que el ordenamiento de los autores del artículo considera, probablemente en forma implícita este aspecto, ya que la solución de las dos primeras alternativas cae precisamente en aquellas que tienen menor coste.

### **6.5 Fortalezas y debilidades**

Es evidente que la PL tiene fortalezas y debilidades. Como resumen de todo lo expuesto a lo largo de este trabajo, cabe destacar entre sus fortalezas que su fundamentación axiomática no sólo justifica los resultados parciales obtenidos sino que, lo que se considera más importante, permite construir un modelo matemático más representativo del proyecto, fundamentalmente debido a la necesidad de emplear límites de los criterios, que incluso pueden mostrar una gama de valores para cada criterio. Se agrega a ello el no necesitar asignar pesos a los criterios ni de establecer umbrales de indiferencia y de aceptación. Permite, por otro lado, un exhaustivo análisis de sensibilidad que no está basado en los pesos de los criterios, común a todos los métodos, sino en la contribución marginal de cada uno de ellos a la obtención del objetivo, lo cual se considera más acertado.

Como debilidad, es una realidad que el modelo no escapa a la subjetividad inherente a cualquier problema de decisión, como lo es por ejemplo la fijación de los coeficientes de las alternativas para criterios cualitativos y la selección de criterios.

Por otro lado, puede argüirse que la fijación de los límites de las restricciones es también a veces subjetiva y eso es cierto. Sin embargo, el análisis de sensibilidad provee una valor de importancia de los criterios que no depende de pesos fijados en forma preferencial sino en los mismos datos del problema, es decir responde a datos intrínsecos del problema y no ajenos al mismo. Consecuentemente, el conocer en forma fehaciente la importancia de cada criterio hace que sea posible poner mayor énfasis y

cuidado en la determinación de aquellos valores de límites que realmente son significativos.

## **6.6 Cumplimiento del objetivo propuesto**

Esta sección tiene por objeto analizar si se han cumplido las hipótesis planteadas al comienzo, en la Sección 1.2; al respecto se tiene que:

1. Queda demostrado que la PL con al agregado de Simus, puede usarse como un método más para la toma de decisiones y especialmente para resolver problemas de naturaleza compleja, con incertidumbre y varios objetivos, como quedó demostrado en el Capítulo 3 y con los ejemplos comentados en las publicaciones especializadas. Con referencia a éstas se tiene:

En la primera publicación, referida a la resolución de un complejo problema de selección de indicadores ambientales, se aplica PL y el modulo 4 de Simus, descripto en la Sección 3.4.5.

En la segunda publicación, referida a tratar la supuesta dicotomía entre crecimiento económico y sostenibilidad, aplica el modulo 1 de Simus que permite a la PL trabajar con problemas que tienen criterios cualitativos.

La tercera publicación que se refiere a una selección de fuentes renovables para generación de energía, prueba que se alcanza el mismo resultado cuando el problema se resuelve por dos métodos distintos, este es AHP y Simus.

Se recuerda que el Capítulo 4 describe en detalle la aplicación de los módulos 1 y 2 de Simus para la resolución de un problema de decisión relativamente complejo sobre proyectos para aprovechar el uso de la tierra en un puerto de Taiwán.

2. Se ha demostrado, al menos heurísticamente, que los modelos para la toma de decisiones producen resultados equivalentes. Esta hipótesis ha quedado demostrada en el análisis de los 45 casos reales y en donde se alcanza una coincidencia acumulada en los ordenamientos del 88.7 %. (Véase tabla 6.1, Sección 6.3).

## **6.7 Conclusión**

Se entiende por todo lo expuesto que el método PL/Simus como herramienta alternativa de análisis, constituye un aporte significativo a la batería de métodos clásicos para la toma de decisiones, y que suministra como mínimo soluciones equivalentes a las alcanzadas por otras técnicas. Por otro lado, se ha demostrado asimismo que cuando el problema es muy complejo, con gran número de alternativas, criterios, interrelaciones y condiciones, la PL/Simus es una herramienta muy adecuada para gestionar la información.

Es indudable que no es éste el final del camino ya que quedan aspectos por corregir y mejorar. Prevemos posibilidades de desarrollos futuros, por ejemplo: con los datos de la matriz de resultados eficientes, en donde hay varios 'inputs' y varios 'outputs' sería

quizás posible aplicar la técnica '*Data Envelopment Analysis*' para encontrar cuál de las fronteras obtenidas en el análisis mono-objetivo, correspondientes a las filas de la matriz, es la más eficiente, en lugar de emplear el procedimiento aditivo (Módulo 2).

No se descarta, por otro lado, que el modelo pueda trabajar en conjunción con los métodos heurísticos convencionales, algo que de hecho ya se hace en la actualidad, pero aprovechando asimismo las ventajas que ofrece el Módulo 1 de Simus.

Se entiende por otro lado que los ejemplos propuestos en las tres publicaciones del compendio reflejan en forma objetiva las hipótesis planteadas al comienzo de esta tesis, referente no sólo a la utilidad de la PL/Simus para resolver problemas con varios objetivos y con criterios cualitativos, sino también en el hecho de demostrar que se puede alcanzar un resultado similar – si no idéntico - trabajando con dos modelos diferentes. Uno de las publicaciones, alcanza por otro lado, usando el modulo 4 de Simus, a encontrar una solución factible a un problema de muy difícil características y del cual no conocemos que haya sido resuelto con anterioridad por algún otro modelo.

Como conclusión puede resumirse que el método propuesto cumple con los dos objetivos planteados en la sección 1.2, referente a que la PL puede emplearse ventajosamente para la resolución de problemas de toma de decisiones y con objetivos múltiples, y que además demuestra que los modelos heurísticos que se utilizan para este fin deberían producir resultados equivalentes. Desde este último punto de vista, considerando que el algoritmo del Simplex sigue estrictos procedimientos matemáticos, se estima que la PL puede tomarse como referencia para analizar los resultados alcanzados por otros métodos, y naturalmente, para resolver problemas similares o más complejos.



**Tabla 6.4 Comparación de diversos proyectos resueltos por diferentes modelos con las soluciones alcanzados por Simus**

Diferentes tipos de proyectos, su resolución y comparación de resultados cuando se resuelven empleando LP / SIMUS								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
#	Área a la que pertenece el proyecto	Título original del proyecto y autor/es	Tipo de proyecto	Componentes del proyecto	Modelo empleado por los autores	Resultados de los autores	Resultados de PL /SIMUS	Comparación de los resultados de los autores con aquellos de PL/ SIMUS
<b>PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA</b>								
01	Navegación fluvial y puertos	(Cities Economics and Economic Development Number 132 – Page 128)	Selección de rutas fluviales e interconexión hídrica	Alternativas: 6 Criterios: 7	SAMI	<u>P</u> 3-P4-P2-P6-P5-P1	<u>P</u> 3-P5-P2-P1-P3-P4	Coincidencia sólo en la primera alternativa
02	Aeropuertos	<i>Integrated MCDA: A Simulation Case Study</i> (Belton <i>et al</i> , 1998)	Programación de vuelos en un aeropuerto	Alternativas: 6 Criterios: 7	SIMULACIÓN y V.I.S.A.	<u>E</u> - <u>F</u> -A-D	<u>F</u> - <u>E</u> -B-D	Coincidencia en las dos primeras, pero invertidas

03	Aeropuertos	<i>A note of the selected multicriteria decision methods and their applications</i>  <i>A Case: Pittsburgh Airport Transportation Project (1999)</i>	Acceso a un aeropuerto	Alternativas: 4 Criterios: 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>AHP</li> <li>GOAL PROGRAM.</li> <li>ELECTRE</li> <li>MAUT</li> </ul>	AHP: A-B-C-D  Programación por metas: <u>A</u>  ELECTRE: <u>A</u> -B-C MAUT: <u>A</u> - <u>C</u> B-D	<u>A</u>  <u>A</u> - <u>C</u>	Coincidencia sólo en la primera alternativa en todos los modelos. En las dos primeras en MAUT
10	Aeropuertos	<i>A Multicriteria Decision Support Methodology for Evaluating Airport Expansion Plans</i> (Vreeker <i>et al</i> , 2001)	Selección de políticas para la expansión de un aeropuerto. Maastricht. (Holanda)	Alternativas: 4 Criterios: 2	REGIME	<u>B</u> - <u>C</u> - <u>A</u> - <u>D</u>	<u>B</u> - <u>C</u> - <u>A</u> - <u>D</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
28	Puertos	<i>Multicriteria decision-making using Electre</i> (Huang <i>et al</i> , 2005)	Selección de proyectos para uso de la tierra en el puerto de Keelung. (Taiwán)	Alternativas: 6 Criterios: 17	ELECTRE	<u>A</u> - <u>F</u> - <u>B/C</u> - <u>E</u> - <u>D</u>	<u>F/A</u> - <u>B/C</u> - <u>D</u> - <u>E</u>	Coincidencia casi perfecta con inversión en el último par
05	Caminos y ferrocarriles	<i>Analytical Network Process Model for Highway Corridor Planning</i> (Piantanakulchai, 2003)	Planeamiento de un corredor vial. (Tailandia)	Alternativas: 4 Criterios: 37	ANP	<u>B</u> - <u>A</u> - <u>C</u> - <u>D</u>	<u>B</u> - <u>A</u> - <u>C</u> - <u>D</u>	Total coincidencia en el ordenamiento

07	Caminos y ferrocarriles	<i>Road Materials</i>  (No se menciona al autor)	Selección de la mejor mezcla para pavimentos. (Polonia)	Alternativas: 4 Criterios: 3	ELECTRE	<u>3</u> -1-4-2	<u>3</u>	Coincidencia sólo en la primera alternativa
17	Urbanismo (Agua potable)	<i>Water supply system decision making using multicriteria analysis</i>  (Morais <i>et al</i> , 2006)	Decisión sobre abastecimiento de agua potable. (Brasil)	Alternativas: 8 Criterios: 4	ELECTRE	<u>A3</u>	<u>A3</u> – A2 – A1	Coincidencia sólo en la primera alternativa
18	Urbanismo (Alcantarillado)	<i>The sustainability of conventional versus nature based sewerage systems</i>  (Lindholm <i>et al</i> , 2003)	Análisis sobre incorporar una zona de la ciudad al alcantarillado urbano o seguir con los pozos ciegos existentes. Oslo (Noruega)	Alternativas: 2 Criterios: 11	ANÁLISIS COSTE/BENEFICIO	<u>Continuar con pozos ciegos</u>	<u>Continuar con pozos ciegos</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
30	<b>Urbanismo</b> (Infraestructura)	<i>Strategic implementation of infrastructure priority projects: Case study in Palestine</i>  (Ziara <i>et al</i> , 2002)	Selección de diez proyectos de infraestructura. Franja de Gaza (Palestina)	Alternativas: 8 Criterios: 7	AHP	<u>WE15</u> <u>WE55</u> WE03 WE08	<u>WE15</u> <u>WE55</u>	Coincidencia en las dos primeras alternativas
24	Transporte	<i>Inadequate route selection oil pipeline through Georgia</i>	Oleoducto Bakú (Mar Negro) – Tbilisi- Ceyhas (Mediterráneo)	Alternativas: 4 Criterios: 10	No se menciona el modelo usado, aunque presuntamente la selección se debió a razones políticas y de	<u>Central Modificado</u>	<u>Central modificado</u>	Total coincidencia en el ordenamiento

		(The Netherlands Commission for Environmental Impact Assessment)			seguridad			
<b>PROYECTOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS</b>								
06	Residuos sólidos	<i>An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management</i>  (Cheng et al, 2003)	Gestión de residuos sólidos. Regina. (Canadá)	Alternativas: 11 Criterios: 11	Emplea: ▪ SWA ▪ ELECTRE ▪ TOPSIS ▪ CGT ▪ WP	Todos los modelos excepto CGT eligen:  <u>6 - 2</u>	<u>6 - 2</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
37	Residuos sólidos	<i>Doctoral Thesis</i> <i>University of Milano</i>  (Tasca, 2006)	Localización de incineradores de residuos domésticos. Reggio Emilia. (Italia)	Alternativas: 4 Criterios: 11	ANALISIS COSTE/BENEFICIO	1. <u>Gabasa 80 Metros</u> 2. <u>Gabasa 120 Metros</u>	1. <u>Gabasa 80 Metros</u> 2. <u>Gabasa 120 Metros</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
<b>PROYECTOS GUBERNAMENTALES</b>								
22	Gobierno	<i>DTLR Multa-Criterios Analysis Manual</i> (Dogdson et al, 2002)	Ejemplo extraído del 'Manual de Procedimientos del Reino Unido'. (Inglaterra)	Alternativas: 7 Criterios: 6	ELECTRE I	<u>F - G</u>	<u>F</u>	Coincidencia sólo en la primera alternativa
33	Gobierno	<i>Strategic</i>	Evaluación estratégica de la					Total

		<i>environmental assessment of Canadian energy policy</i> (Noble, 2002)	política ambiental canadiense. Ottawa. (Canadá)	Alternativas: 5 Criterios: 11	No se indica el modelo usado	<u>3-1-5-2-4</u>	<u>3-1-5-2-4</u>	coincidencia en el ordenamiento
<b>PROYECTOS DE LOCALIZACIÓN INDUSTRIAL Y DE DISTRIBUCIÓN</b>								
09	Localización industrial	<i>An Application of the Analytical Hierarchy Process to International Location Decision-Making</i> (Atthirawong <i>et al</i> , 2002)	Determinación para una localización industrial. (Tailandia)	Alternativas: 4 Criterios: 3	AHP	<u>Tailandia</u>	<u>Tailandia</u> - China	Total coincidencia en el ordenamiento
21	Localización académica	<i>Aplicação Conjunta de Métodos do Apoio Multicriterio para decisão dos impactos de uma Universidade Pública Brasileira</i> (Monteiro, 2002)	Aplicación conjunta de métodos de apoyo multicriterio para evaluar impactos de una universidad. (Brasil)	Alternativas: 10 Criterios: 5	No se indica el modelo usado	<u>Niteroi</u> - Volta Redonda - Campo de Goytacazes - Santo Antonio de Padua	<u>Niteroi</u> - Itaperuna – Goytacazes – Cabo Frio – San Joao	Coincidencia sólo en la primera alternativa
23	Localización	<i>The MCDM Based</i>	Rediseño del					

	industrial y distribución	<i>redesign of the Distribution System</i> (Zak <i>et al</i> , 2009)	sistema de distribución de una compañía electrónica. (Polonia)	Alternativas: 7 Criterios: 29	ELECTRE III y AHP	ELECTRE <u>A3</u> -A4-A6-A7 A1-A2-A5  AHP A7-A6-A3-A1 A4-A2-A5	<u>A3</u> – A2	Coincidencia sólo en la primera alternativa
<b>PROYECTOS DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA</b>								
12	Centrales hidráulicas	<i>Ranking Projects Using the ELECTRE Method</i>  (Buchanan <i>et al</i> , 1999)	Ordenamiento de proyectos eléctricos. (Nueva Zelanda)	Alternativas: 4 Criterios: 5	ELECTRE	<u>A-B</u> -D-E-C	<u>A-B</u> -E-C-D	Coincidencia en las dos primeras alternativas
13	Centrales hidráulicas	<i>Medium hydro-power study project (MHSP) –</i> (ACRES / LAVALIN, 1997)	Estudio de factibilidad de proyectos hídricos. (Nepal)	Alternativas: 16 Criterios: 10	No se indica el modelo usado aunque probablemente haya sido Coste / Beneficio	<u>BH-5</u> <u>LBH-1</u> <u>UMS-3</u> <u>ST/ML1</u>	<u>BH-5</u> <u>LBH-1</u> <u>UMS-3</u> <u>ST/ML1</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
26	Líneas de transmisión	<i>Use of geographic information systems in an environmental impact assessment of an overhead power line</i>  (Warner <i>et al</i> , 2002)	Construcción de una línea de alta tensión entre tres ciudades. KwaZulu . (Sud África)	Alternativas: 4 Criterios: 17	GIS	Primera sección: Alt. <u>IG</u>  Segunda sección Alt. <u>IIG</u>	Primera sección: Alt. <u>IG</u>  Segunda sección Alt. <u>IIG</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
50	Generación eléctrica	<i>Análisis Multicriterio de decisiones – Métodos Promethee</i>	Análisis multicriterio para la toma de			Portugal Bélgica	Bélgica Reino Unido	

		(Aragónés, 2008)	decisión	Alternativas: 6 Criterios: 7	PROMETHEE	Reino Unido Francia Alemania España	Francia Portugal España	No hay coincidencias
49	Generación eléctrica	<i>Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources</i> (Nigim et al, 2004)	Estudio de pre factibilidad usando técnicas de multicriterio para priorizar fuentes viables de energía renovable. Toronto. (Canadá)	Alternativas: 5 Criterios: 6	AHP	<u>Solar</u> - <u>Eólica</u>	<u>Solar</u> - <u>Eólica</u>	Coincidencia en las dos primeras alternativas
11	Distribución de energía térmica y eléctrica	<i>Multi-Criteria Planning of Local Energy with Multiple Energy Carriers</i> ( Lóken, 2007)	Importación de energía eléctrica (Noruega)	Alternativas: 4 Criterios: 7	MAUT y AHP	MAUT : C– B – A - D  Una versión de AHP: <u>B</u> – D- A – C  Otra versión de AHP <u>B</u> – A – D- C	<u>B</u>	Coincidencia sólo en la primera alternativa
66	Fuentes de energía eléctrica	<i>An Integrated Multi-Criteria System to Assess Sustainable Energy Options: An Application of the Promethee Method</i> (Cavallaro, 2005)	Fuentes no tradicionales de generación eléctrica. (Italia)	Alternativas: 4 Criterios: 10	PROMETHEE	Eólica Mareas Biomasa Fotovoltaica	Biomasa Mareas Eólica Fotovoltaica	No hay coincidencias

PROYECTOS AGRÍCOLAS								
25	Protección de cultivos	<i>Analytical Hierarchy Process</i>  (University of Iowa)	Agricultura. (EE.UU.)	Alternativas: 3 Criterios: 4	AHP	<u>Genmarker</u> <u>Storage</u> <u>Microcop</u>	<u>Genmarker</u> <u>Storage</u> <u>Microcop</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
39	Investigación agrícola-ganadera	<i>Priority Setting in Agricultural Research in Ukraine</i>  (ĐORĐEVIÆ <i>et al</i> , 2002)	Investigación agrícola (Ucrania)	Alternativas: 17 Criterios: 3	AHP	<u>Carne de cerdo</u> Trigo Uvas Leche Maíz Carne vacuna	<u>Carne de cerdo</u> Leche Soja Frutales Cebada	Coincidencia sólo en la primera alternativa
41	Uso sostenible de la tierra agrícola	<i>Multicriteria Evaluation of Sustainable Agricultural Land Use. A case study of Lesvos</i>  (Hermanides <i>et al</i> , 1998)	Evaluación de agricultura sostenible. Isla de Lesvos – (Grecia)	Alternativas: 4 Criterios: 20	REGIME	<u>4S</u>	<u>4S</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
PROYECTOS DE PLANEAMIENTO ECONÓMICO								
63	Planeamiento económico	<i>Business location case study</i>  (Belton <i>et al</i> , 2001)	Estudio de localización de un negocio	Alternativas: 7 Criterios: 4	No indica el modelo usado	Bruselas París Ámsterdam	Londres Ámsterdam Varsovia	No hay coincidencias
15	Planeamiento económico	<i>Some particular aspects concerning Electre method applications</i>	Alternativas de selección de inversiones. (Rumania)		ELECTRE EN	ELECTRE I: A2-A3-A4- A1-A5		No hay coincidencias,



		(Condurache <i>et al</i> , 2003)		Alternativas: 5 Criterios: 4	DIFERENTES VERSIONES	ELECTRE II: A1-A2-A3- A4-A5 ELECTRE IV: A4-A1-A2- A3-A5 ELECTRE Modificado: A3-A5-A1- A2-A4	A5 – A1 –A2 – A4	pero observar que tampoco hay coincidencias entre las diferentes soluciones de Promethee
<b>PROYECTOS DE VIVIENDAS</b>								
16	Estilos constructivos	<i>Lecture 1.3.2 : Multi- criterion decision- making using Electre</i> (La Commune de Meyrin, 1998)	Selección de estilos de viviendas. Ginebra. (Suiza)	Alternativas: 4 Criterios: 11	ELECTRE III	<u>5</u> - <u>6</u>	<u>5</u> - <u>6</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
<b>PROYECTOS VARIOS</b>								
47	Toma de decisión	<i>Strict uncertainty: A criterion for moderately pessimistic decision makers</i> (Ballester, 2002)	Se propone una regla de decisión para ordenar actividades bajo incertidumbre estricta	Alternativas: 6 Criterios: 3	PROGRA- MACIÓN COMPRO- MISO	<u>A3</u> – <u>A4</u> – A6 – A1 – A2 – A5	<u>A3</u> – <u>A4</u> – A2 – A5 – A6- A1	Coincidencia en las dos primeras alternativas
51	Medicina	<i>Selection of a medical treatment</i> (Autor no mencionado)	Selección de un tratamiento médico	Alternativas: 3 Criterios: 3	MAUT	<u>Medicación</u> Ejercicio Dieta	<u>Medicación</u>	Coincidencia sólo en la primera alternativa
14	Selección de personal	<i>A Multicriteria</i>	Enfoque multicriterio	Alternativas: 4		<u>Montreal 1</u>	<u>Montreal 1</u>	Total

		<i>Approach for Selecting a Portfolio</i> <i>Manager. EE.UU.</i> (Hababou <i>et al</i> , 1998)	para seleccionar un gerente de inversiones en proyectos	Criterios: 9	PROMETHEE	<u>Calgary 1</u> <u>Toronto 1</u> <u>Montreal 2</u>	<u>Calgary 1</u> <u>Toronto 1</u> <u>Montreal 2</u>	coincidencia en el ordenamiento
64	Tecnología	<i>Selection of broadband technology for the Universidad Nacional de Colombia</i> (Cortez <i>et al</i> , 2007)	Selección de una tecnología de banda ancha para la Universidad Nacional de Colombia. (Colombia)	Alternativas: 4 Criterios: 8	AHP	<u>ADSL</u> Fibra óptica Cable LMDS	<u>ADSL</u> Cable Fibra óptica	Coincidencia sólo en la primera alternativa
45	Actividad militar	<i>Electre application for the selection of a fighter bomber aircraft</i> (Romero, 1996 b)	Modelo Electre aplicado a la selección de un caza bombardero	Alternativas: 4 Criterios: 4	ELECTRE	<u>A</u>	<u>A</u>	Total coincidencia en el ordenamiento Sólo una alternativa seleccionada en ambos modelos
29	Elección de un método de selección	<i>An examination of the effectiveness of multi-dimensional decision making methods: A decision-making paradox</i> (Triantaphyllou <i>et al</i> , 1989)	Examen de la efectividad de modelos de decisión multicriterio	Alternativas: 3 Criterios: 3	AHP	<u>Suma ponderada</u>	<u>Suma ponderada</u>	Total coincidencia en el ordenamiento Sólo una alternativa seleccionada en ambos modelos
08	Compra de un vehículo	Using the Analytic	Selección de un automóvil					Total

		Hierarchy Process (AHP)  (Autor no mencionado)		Alternativas: 3 Criterios: 4	AHP	<u>B-C-A</u>	<u>B-C-A</u>	coincidencia en el ordenamiento
<b>PROYECTOS MEDIOAMBIENTALES</b>								
19	Medio ambiente (Reciclaje)	<i>Promethee Multicriteria Analysis for Evaluation of Recycling  Strategies in Malaysia  (Chenayah et al, 2006)</i>	Medios de publicidad para promover el reciclaje (Carteles, exhibiciones, material impreso, etc.). (Malasia)	Alternativas: 5 Criterios: 4	PROMETHEE	<u>A3 - A2</u>	<u>A3 - A2</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
67	Medición de la sostenibilidad urbana	<i>Measuring Sustainability:  A Multi-Criterion  Framework  (Munda, 2003)</i>	Medición de la sostenibilidad	Alternativas: 4 Criterios: 9	MAUT	<u>Moscú – Budapest – Nueva York - Ámsterdam</u>	<u>Moscú – Budapest - Ámsterdam - Nueva York</u>	Coincidencia en las dos primeras alternativas
48	Gestión medio ambiental	<i>Instrumentos económicos para la gestión ambiental: Decisiones mono criterios versus decisiones multi criterio (Falconi et al, 2004)</i>	Instrumentos económicos para la gestión medio ambiental	Alternativas: 4 Criterios: 11	NAIADE	<u>D – C- B - A</u>	<u>D – B – C- A</u>	Coincidencia sólo en la primera alternativa

20	Medio ambiente (Reciclaje)	<i>Multicriteria Analysis for Evaluation of Recycling Strategies in Malaysia</i> (Chenayah <i>et al</i> , 2006)	Medios para el reciclaje. (Contenedores, camiones, centro colector, etc.)	Alternativas: 5 Criterios: 4	PROMETHEE	<u>B4-B1-B2-B3-B5</u>	<u>B4-B1-B2-B3-B5</u>	Total coincidencia en el ordenamiento
<b>PROYECTOS RELACIONADOS CON ACTIVIDADES INDUSTRIALES</b>								
27	Minería	<i>Multicriteria choice of ore transport system for an underground mine: application of Promethee methods</i> (Elevli <i>et al</i> , 2004)	Elección del sistema de transporte para una mina subterránea. (Turquía)	Alternativas: 5 Criterios: 6	PROMETHEE	IRH-ERH-SIS-DES-SNS	ERH – DES - SIS	No hay coincidencias
65	Fabricación de bicicletas	<i>A Multicriteria Approach to Decision Aid: Promethee &amp; GAIA</i> (Mareschal, 2008)	Selección de los medios de comunicación para promocionar un producto	Alternativas: 6 Criterios: 5	PROMETHEE	<u>CMM</u> Herald Anuncios Correo News - NCB	<u>CMM</u> Correo News – NCB Anuncios Herald	Coincidencia sólo en la primera alternativa
46	Industria automovilística	<i>Multi-Criteria Decision Support for Integrated Technique Assessment</i> (Treitz <i>et al</i> , 2005)	Selección de diferentes bases de pintura para automóviles (Austria)	Alternativas: 6 Criterios: 7	PROMETHEE	<u>1K UV</u> E-IR 2KU-IR 1K UV-A E-T 2K-UT	<u>1K UV</u> 2KU-IR E-T	Coincidencia sólo en la primera alternativa

## **Resumen de este trabajo**

Esta tesis está relacionada con la toma de decisiones en proyectos complejos en los cuales es necesario adoptar una alternativa de entre varias posibles y sujetas todas ellas a una serie de restricciones. Es éste un problema muy conocido y muy frecuente y que puede resolverse mediante Programación Lineal, técnica desarrollada a mediados del siglo pasado, la cual suministra, si existe, una solución óptima al problema, es decir halla un óptimo de Pareto, y que por lo tanto no puede mejorarse. Se han desarrollado muchas otras técnicas de tipo heurístico, basadas en distintos principios, para solucionar este problema de gran interés en la práctica, sin embargo todas ellas proveen soluciones que si bien pueden satisfacer al centro decisor y partes interesadas, no arrojan una solución óptima sino satisfaciente.

El aporte de esta tesis es que aprovecha las características de optimización paretiana de la Programación Lineal, con su capacidad para tratar problemas de grandes dimensiones en cantidad de alternativas y en criterios de selección, que en general no son aptos para ser resueltos por técnicas heurísticas, y la potencialidad de la técnica para representar en forma matemática situaciones reales y muy complejas, como son la mayoría de los problemas que se presentan en la vida real. Esta capacidad de modelación está basada en la posibilidad de representar matemáticamente situaciones condicionantes, de restricciones de capital, de límites o umbrales que se establecen por diversas razones, tales como el máximo permitido de contaminación atmosférica, etc. Sin embargo, desgraciadamente, la PL puede trabajar sólo con un único objetivo, aunque se han hecho valiosos intentos para eliminar esta restricción.

Este trabajo propone el empleo de la técnica SIMUS, la cual, basada en la PL posibilita ampliar su campo de acción al permitir no sólo trabajar con cualquier cantidad de objetivos, sean éstos de máxima, de mínima o mezclados, sino también el empleo de criterios subjetivos, que es otro aspecto limitante de la PL clásica. Es decir Simus permite ampliar el campo de aplicación - por cierto muy amplio de la PL – al facilitar la resolución, aunque no con un resultado óptimo, sino satisfaciente, de situaciones muy complejas, con varios objetivos, cientos o miles de alternativas y criterios, y empleando mezclados, criterios objetivos y subjetivos.

Una ventaja inherente de la PL es que no necesita que se determinen pesos o niveles de importancia y por lo tanto reduce considerablemente el riesgo de obtener soluciones satisficientes que dependen en gran medida de la subjetividad del centro decisor. Simus se ha contrastado con una cantidad apreciable de problemas reales, resueltos por los métodos heurísticos y cuyo resultado arroja un gran porcentaje de coincidencia no solo en las alternativas elegidas sino también en su ordenamiento.

Por lo tanto, se considera que Simus provee una herramienta que puede ser de gran utilidad en la resolución de complejos problemas de decisión que son cada día más frecuentes.

### **Resum d'aquest treball**

Aquesta tesi està relacionada amb la presa de decisions en projectes complexos en els quals és necessari adoptar una alternativa d'entre diverses possibles i subjectes totes elles a una sèrie de restriccions. És aquest un problema molt conegut i molt freqüent i que pot resoldre's mitjançant Programació Lineal, tècnica desenvolupada a mitjan segle passat, la qual subministra, si existeix, una solució òptima al problema, és a dir troba un òptim de Pareto, i que per tant no pot millorar-se. S'han desenvolupat moltes altres tècniques de tipus heurístic, basades en diferents principis, per a solucionar aquest problema de gran interès en la pràctica, no obstant açò totes elles proveeixen solucions que si bé poden satisfer a l'ens decisor i parts interessades, no llancen una solució òptima sinó satisfactòria.

L'aportació d'aquesta tesi és que aprofita les característiques d'optimització paretiana de la Programació Lineal, amb la seua capacitat per a tractar problemes de grans dimensions en quantitat d'alternatives i en criteris de selecció, que en general no són aptes per a ser resolts per tècniques heurístiques, i la potencialitat de la tècnica per a representar en forma matemàtica situacions reals i molt complexes, com són la majoria dels problemes que es presenten en la vida real. Aquesta capacitat de modelació està basada en la possibilitat de representar matemàticament situacions condicionants, de restriccions de capital, de límits o llindars que s'estableixen per diverses raons, tals com el màxim permès de contaminació atmosfèrica, etc. No obstant açò, desgraciadament, la PL pot treballar només amb un únic objectiu, encara que s'han fet valuosos intents per a eliminar aquesta restricció.

Aquest treball proposa l'ocupació de la tècnica SIMUS, la qual, basada en la PL possibilita ampliar el seu camp d'acció en permetre no solament treballar amb qualsevol quantitat d'objectius, siguin aquests de màxima, de mínima o barrejats, sinó també l'ocupació de criteris subjectius, que és un altre aspecte limitant de la PL clàssica. És a dir Simus permet ampliar el camp d'aplicació - per cert molt ampli - de la PL en facilitar la resolució, encara que no amb un resultat òptim, sinó satisfactòria, de situacions molt complexes, amb diversos objectius, centenars o milers d'alternatives i criteris, i emprant barrejats, criteris quantitatius i qualitatius.

Un avantatge inherent de la PL és que no necessita que es determinen pesos o nivells d'importància i per tant redueix considerablement el risc d'obtenir solucions satisfactòries que depenen en gran mesura de la subjectivitat de l'ens decisor. Simus s'ha contrastat amb una quantitat apreciable de problemes reals, resolts pels mètodes heurístics i el resultat dels quals llança un gran percentatge de coincidència no solament en les alternatives triades sinó també en el seu ordenament.

Per tant, es considera que Simus proveeix una eina que pot ser de gran utilitat en la resolució de complexos problemes de decisió que són cada dia més freqüents.

## **Abstract**

This thesis is related with decision-making for complex problems, when it is necessary to choose an alternative or a project amongst many, and all of them subject to a series of restrictions. This is a very well known and frequent problem and which can be solved by Linear Programming, technique developed in the 1950's, and that delivers, if it exists, an optimal solution to the problem. This result is a Pareto optimum and consequently cannot be improved. In addition, many heuristic techniques have been developed - grounded on diverse principles - and considering different objectives to solve this problem, which has a great practical interest. Most of them supply solutions that can satisfy the decision-maker and stakeholders; however, they do not produce an optimal solution but a satisfying approach.

The method proposed in this thesis takes advantage of the Paretian optimization of Linear Programming, related to its capacity to solve large problems (for instance for river basins), with a great number of projects or alternatives and selection criteria, which in general are not suitable to be cracked by heuristic techniques. In addition, it also takes advantage of the power of the tool to represent in a mathematical format actual and complex scenarios, as are most of the decision problems in real life. This capacity of modeling is based in the possibility of mathematically representing conditioning scenarios such as fund restrictions and cashflow, limits or thresholds established for different reasons, such as the maximum allowable contribution to atmospheric contamination, maximum extraction of water from wells considering natural refilling, etc. However, Linear Programming, unfortunately, only works with one objective, albeit many attempts have been made to overcome this disadvantage which is not present in heuristic methods.

This work proposes using the Simus algorithm, which allows to greatly enhance Linear Programming applications since it permits working with any quantity of objectives, either of maximization, minimization or equality, and to employ qualitative restrictions, which is another limiting aspect of the classical Linear Programming. In conclusion Simus permits enlarging the field of application of this technique - certainly already very extensive - in order to reach a result, albeit not optimal, but satisfying to the decision-maker and stakeholders, regarding very complex scenarios, with several objectives, with hundreds or thousands of alternatives and criteria and mixing, if necessary, quantitative and qualitative constraints.

An inherent advantage of Linear Programming rests in the fact that it does not need weights or levels to gauge importance of criteria, and consequently, the risk of obtaining

satisfying solutions which depend on the decision-maker subjectivity is greatly reduced. Simus results have been contrasted with those of an appreciable number of actual problems, solved with different heuristic methods by diverse researchers, and the result shows a large percentage of coincidences not only in the alternatives chosen but in their ranking too. As a summary, it is considered that Simus supplies a tool which can be very useful in solving complex decision-making problems which are nowadays more frequent and increasing.



## GLOSARIO

*Acción:* Indica el tipo el propósito de cada restricción, es decir indicar que se desea una maximización, una minimización o una igualdad.

*Análisis de sensibilidad:* Análisis de cómo varía una solución cuando se varían ciertos parámetros. Es útil para determinar la estabilidad de una solución dada con respecto a posibles cambios de algunas variables

*Causalidad:* Se aplica a la relación causa y efecto. En el contexto de esta tesis se refiere a cómo influyen en forma seriada los efectos de un proyecto que generan un cierto impacto que a su vez tiene influencia en otro y así sucesivamente.

*Coeficientes de la matriz de decisión ( $a_{ij}$ ):* Valores que se colocan en la intersección de cada columna con cada fila para demostrar la contribución de cada alternativa (en columnas) en el cumplimiento de lo requerido por cada restricción o criterio (en filas).

*Contrastación:* En el caso de esta tesis es la comparación de los resultados de diversos problemas obtenidos por diferentes algoritmos y el método Simus.

*Criterios:* Ver ‘Restricciones’

*Entropía:* Medida de la cantidad de información de un conjunto de datos.

*Externalidades:* Acciones para las cuales no hay un valor del mercado, pero que sin embargo afectan a la sociedad, la economía y el medioambiente. Por ejemplo la producción de ruido en una autopista, la degradación del suelo, la pérdida de áreas verdes, etc.

*Impacto:* Efecto de un proyecto sobre el medio ambiente, la economía, la sociedad, etc. Pueden ser positivos y negativos.

*Indicadores:* Son métricas que tienen varias funciones, por ejemplo medir la intensidad de un impacto, capacidades limites, tendencias, etc.

*Kernel:* En este trabajo se refiere a un subconjunto asociado con un mapeo.

*Matriz de decisión:* Matriz que en columnas y en filas respectivamente refleja los proyectos o alternativas y los criterios o restricciones. Es común a todos los modelos de resolución de problemas de decisión. En PL la matriz de decisión tiene además una columna adicional que corresponde al vector de requerimientos, o lo que lo mismo, de los valores que limitan las restricciones.

*Matriz de soluciones eficientes:* Matriz cuyos componentes son soluciones eficientes de un mismo problema resuelto en forma sucesiva considerando objetivos diferentes.

*Matriz encadenada:* Matriz que analiza en forma seriada la relación con respecto impactos entre acciones, efectos, consecuencias y receptores.

*Método Simplex:* Algoritmo de resolución de un problema de Programación Lineal donde se trata de encontrar la mejor mezcla u ordenamiento de alternativas o proyectos, que dependen de criterios o restricciones y a fin de cumplimentar un objetivo establecido

*Modelación:* Intento de generar un modelo matemático que representa aunque sea en forma aproximada las condiciones de un problema real.

*Objetivo simple:* Fin que se desea alcanzar, expresado como una función matemática lineal que puede ser de maximización o minimización. Generalmente no tiene un valor numérico especificado

*Objetivos múltiples:* Múltiples fines que se desea alcanzar. Por ejemplo que un proyecto tenga como objetivos un mínimo coste monetario, a la vez que máxima rentabilidad, mínimo daño al medio ambiente, máximo beneficio a la población, etc. Es el tipo común de objetivos con que trabajan los métodos heurísticos para toma de decisiones.

*OCDE:* ‘Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico’. Es una organización internacional compuesta por 33 estados

*Politopo:* Conjunto formado por la intersección de líneas (en un espacio de dos dimensiones y que constituye un polígono), por planos (en un espacio de tres dimensiones, y que constituye entonces un poliedro), por hiperplanos (en un espacio de n- dimensiones, y que constituye entonces un hiperpoliedro).

*Problema dual:* Es la inversa de un problema directo de PL, en donde las columnas del problema directo constituyen las filas del dual, en tanto que las filas del directo se transforman en columnas del dual. Ambos problemas se resuelven simultáneamente con el algoritmo del Simplex, es decir al hallar la solución del problema directo se halla también la del dual. Aunque ambos producen el mismo valor del funcional, sus respectivas variables tienen significados totalmente diferentes. Las variables del problema directo dan el valor de las alternativas, en tanto que las variables del dual expresan el valor marginal de cada restricción. El dual tiene una enorme importancia en PL y en su aplicación a problemas prácticos ya permite conocer, entre otros aspectos, la sensibilidad de la solución alcanzada.

*Problema primal o directo:* Es el problema normal en PL en donde una matriz de decisión representa alternativas y criterios o restricciones y obedeciendo a un objetivo. Se resuelve por medio del algoritmo del Simplex

*Programación Lineal (PL):* Técnica que trata de las relaciones lineales entre variables en problemas donde hay que optimizar una función lineal sujeta a restricciones lineales Fue desarrollada por Leónid Kantoróvich para optimizar recursos.

*Programación no lineal:* Formada por una función objetivo y restricciones no lineales. Este sistema no se resuelve por el algoritmo del Simplex, (sino en algoritmos basados en la Teoría de Khun y Tucker) y aunque también existe una solución dual que arroja valores marginales (Multiplicadores de Lagrange), estos valores son puntuales y no constantes como en el caso de la PL

*Restricciones cualitativas:* Aquellas que expresan opiniones no cuantificables con exactitud en forma directa. Por ejemplo, Bueno. Malo, Conveniente, No deseable, etc. Muy común en proyectos por ejemplo cuando se pide la opinión de la gente con respecto a los beneficios o perjuicios de un proyecto.

*Restricciones cuantitativas:* Aquellas que representan cantidades cuantificables tales como Km, m<sup>3</sup>, mg/m<sup>3</sup>, ppb, etc.

*Restricciones:* Condiciones que deben cumplir los proyectos o alternativas a analizar para cumplir con el objetivo propuesto Constituyen el medio empleado para seleccionar las alternativas y pueden obedecer a acciones de maximización, minimización o igualdad, y deben cumplir con un valor numérico definido.

*Simplex:* Algoritmo desarrollado por George Dantzig que permite resolver eficientemente problemas de PL

*Solver:* Agregado o rutina de Excel que aplica el algoritmo del Simplex.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACRES/LAVALIN (1997). *Medium hydro-power study project (MHSP)* –The World Bank
- Alberto, C., Carignano, C. (2004). Métodos no paramétricos y apoyo multicriterio a las decisiones: Eficiencia de la educación superior en Argentina – Universidad Nacional de Córdoba.  
<[http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/15modelos\\_matematicos\\_interdisciplinarios/15-modelos\\_matematicos\\_interdisciplinarios-01.pdf](http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosparapublicacion/15modelos_matematicos_interdisciplinarios/15-modelos_matematicos_interdisciplinarios-01.pdf)>  
[Consultado: 10 de octubre de 2010]
- Aragonés, P. (2008). *Análisis Multicriterio de Decisiones. Métodos Promethee. Apuntes de clase*, Universidad Politécnica de Valencia, España
- Aragones, P., Gómez-Senent, E. (2001). Técnicas de ayuda a la decisión multicriterio – Cuaderno de apuntes – Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica de Valencia
- Atthirawong, W, Mac Carthy, B. (2002). *An Application of the Analytical Hierarchy Process to International Location Decision-Making- Paper*, University of Nottingham
- Ballesteros, E. (2002). *Strict uncertainty: A criterion for moderately pessimistic decision makers. Decision Sciences*; Winter 2002; 33, 1; AB/INFORM Global
- Barba-Romero, S. (1997). 3. *Conceptos y soportes informáticos de la decisión multicriterio discreta*. Fuente: Martínez, Eduardo y Escudey, Mauricio (eds.) (1997), Evaluación y decisión multicriterio: reflexiones y experiencias, Santiago, USACH, UNESCO © 1997
- Barda, O., Dupuis, J., Lencioni, P. (1990). Multicriteria Location of Thermal Power Plants – *European Journal of Operations Research*, 45, pp. 332-346
- Behzadian. M, Kazemzadeh, R., Albadvi, A., Aghdasi, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operations Research*, 200 (2010), 198-215
- Belton, V., Stewart, T., (2001). *Multiple Criteria Decision Analysis – An Integrated Approach*, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London
- Belton, V., Elder, M. (1998). *Integrated MCDA: A Simulation Case Study. Management Science*, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland
- Brans, J., Mareschal, B. (2004). *Multiple criteria decision analysis – Chapter 5 – Promethee methods*.

< <http://info.wlu.ca/~wwwmath/courses/graduatecourses/ma536/promethee.pdf>>

[Consultado: 28 de setiembre de 2010]

Brans, J., Vincke and Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The Promethee method, *European Journal of Operational Research* 24.

Brans, J., Vincke, Ph. (1985). A preference ranking organization method: The Promethee method, *Management Science* 31, 647-656

Brans, J., Mareschal, B.; Vincke, Ph. (1984). PROMETHEE: A new family of outranking methods in MCDM en Brans, J.P. Ed. *Operational Research '84*. North Holland (1100 p.); pp. 447-490.

Brans, J. (1982). "L'Ingénierie de la décision. Elaboration d'instruments d'Aide à la décision. La méthode PROMETHEE". Université LAVAL. Colloque d'Aide à la Décision, Québec, pp. 183-213

Buchanan, J., Sheppard, P. (1999). *Ranking projects using the Electre method*. Technical paper, University of Waikato, New Zealand

Calderón, E., Goger, T. (2009). *Integrated Assessment of Environmental Impact on Traffic and Transport Infrastructure* ISBN: 078-84-7493-401-4

Cavallaro, F (2005). *An Integrated Multi-Criteria System to Assess Sustainable Energy Options: An Application of the Promethee Method* - Fondazione Eni Enrico Mattei - Working Papers

Charnes, A. A., and Cooper, W.W. (1961). *Management models and industrial applications of linear programming*, John Wiley and Sons.

Chenayah, S., Takeda, E. (2006). *Promethee Multicriteria Analysis for Evaluation of Recycling Strategies in Malaysia*. Discussion papers in Economics and Business, with number 05-01, Osaka University

Cheng, S., Chan, C., Huang, G. (2003). An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (2003) 543-554

Condurache, G., Ciobanu, R-M. (2003). *Some particular aspects concerning Electre method applications*

<<http://www.unitus.it/mcda57/lavori/PapConduracheCiobanu.pdf>>

[Consultado: 17 de abril de 2010]

Cohon, J. (1978). *Multiobjective Programming and Planning* – Academic Press, New York.

- Cortez, F., García, M., Aragonés, P. (2007) Selection of broadband technology for the Universidad Nacional de Colombia. *Ingeniería e Investigación*, Vol. 27 Número 1, Bogotá
- Dantzig, G. (1948). *Linear Programming and Extensions*. United States Air Force
- De Keyser, W., Peeters, P. (1996). A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods. *European Journal of Operational Research*. Volume 89, Issue 3, 22 March 1996, Pages 457-461
- Dodgson, J., Spackman, M., Pearman, A. (2002). DTLR (Department of Transportation, Local Government and Regions). *Multicriteria Analysis Manual*. National Economic Research Associates and DTLR members, U.K.
- DORĐEVIĆ, M., HUNJAK, T. (2002). Priority Setting in Agricultural Research in Ukraine *Agriculturae Conspectus Scientificus*, Vol. 67 (2002) No. 2 (57-68)
- Duckstein, L., Treichel, W., Magnouni, S. (1994). Ranking groundwater management by multicriterion analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management* 120(4):546-565; jul.-ago. 1994.
- Dutta, G., Fourer, R. (2001). *A Survey of Mathematical Programming Applications in Integrated Steel Plants*
- Edwards, W. (1977). How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-7, 326-340.
- Elevli, B, Demirci, A. (2004). *Multicriteria choice of ore transport system for an underground mine: application of PROMETHEE methods*. International Platinum Conference 'Platinum Adding Value'3-7 October 2004, Sun City, South Africa
- Falconi, F., Burbano, R. (2004). Instrumentos económicos para la gestión ambiental: Decisiones monocriteriales versus decisiones multicriteriales. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REVIBEC)*. Vol. 1 2004-págs. 11-20
- Fichefet, J., Leclercq, J. (1986). A Multicriteria Microcomputer –assisted System for the Identification of Bacteria. *European Journal of Operations Research*, 24, pp. 12-22
- Figueira, J., Graco, S., Ehrgott, M. (editores) (2005). *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* - Springer
- García, F., Munier, N. (2009). *Determinación de la política para la expansión de un aeropuerto-Trabajo final de 'Herramientas para la toma de decisiones'*, para el

Máster en Dirección y Gestión de Proyectos - Universidad Politécnica de Valencia, España

Hababou, M., Martel, J-M. ( 1998). *A Multicriteria Approach for Selecting a Portfolio Manager*. Schulich School of Business, York University

Hermanides, C., Nijkamp, P. (1998). *Multicriteria Evaluation of Sustainable Agricultural Land Use. A case study of Lesvos- Multicriteria Analysis for Land Use Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands

Hidalgo, F. (2007). *Análisis multicriterio para la óptima ubicación de una central de energía a partir de biomasa en Andalucía*. Artículo, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla. <  
[http://www.etsia.upm.es/ANTIGUA/DIRECCION/eu/documentos/Certamen\\_Arquimedes/007-FranciscoHidalgo.pdf](http://www.etsia.upm.es/ANTIGUA/DIRECCION/eu/documentos/Certamen_Arquimedes/007-FranciscoHidalgo.pdf)> [Consultado: 07 de octubre de 2010]

Hobbs, B.F., Horn, G.T. (1997). Building Public Confidence in Energy Planning: A Multimethod MCDM Approach to Demand-Side Planning at *BC Gas - Energy Policy*, vol. 25 (3), p. 357-375

Huang, W-C, Chen, C-H. (2005). Using the Electre II method to apply and analyze the differentiation theory. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 5, pp. 2237 - 2249, 2005

Hwang, C., and Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making methods and applications survey*, Springer.

Ignizio, J., Cavallier, P ( 1994). *Linear Programming* . Prentice Hall

Jaramillo, P. (2002). *Métodos de Análisis Multiobjetivo para problemas continuos*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín Módulo 4  
 <[http://pisis.unalmed.edu.co/vieja/cursos/analisis\\_decisiones/AD\\_4\\_%20ponderantes%20y%20compromiso.pdf](http://pisis.unalmed.edu.co/vieja/cursos/analisis_decisiones/AD_4_%20ponderantes%20y%20compromiso.pdf)> [Consultado: 27 de abril de 2010]

Jones. D., Tamiz, M, (2010). *Practical Goal Programming* – Springer

Joumard, R., Gudmunsson, H. (eds) (2010). *Indicators of Environmental Sustainability in Transport: An Interdisciplinary approach to methods* ISBN: 978-2-85782-664-2

Kantorovich, L. (1959). *La asignación óptima de recursos*. Editorial Ariel, 1968

Keeney, R., Raiffa, H.: (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Wiley, New York.

Keeney, R.L. y Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*. Cambridge University Press, Cambridge.



- Korhonen, P., Topdagi, H. (2003). Performance of the AHP in comparison of gains and losses. *Mathematical and Computer Modeling*. Volume 37, Issues 7-8, April 2003, Pages 757-766
- La Commune de Meyrin (1988). Lecture 1.3.2: *Multi-criterion decision-making using ELECTRE*.  
<[http://hydram.epfl.ch/personnes/Paschoud\\_UDMS99.pdf](http://hydram.epfl.ch/personnes/Paschoud_UDMS99.pdf)>. [Consultado: 19 de diciembre de 2009]
- Leontief, W. (1951). Input-Output Economics, *Scientific American*, October 1951, pp. 15-21.
- Leyva Lopez, J-C. (2004). Multicriteria decision aid application to a student selection problem. *Pesquisa Operacional*, v.25, n.1, p.45-68, Janeiro a Abril de 2005 45
- Lindholm, O., Kine, H. (2003). *The sustainability of conventional versus nature based sewerage systems* – COST 8 -Trento, Italy
- Løken, E. (2007). *Multi-Criteria Planning of Local Energy Systems with Multiple Energy Carriers*-Thesis Doctoral – Norwegian University of Science and Technology
- Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K., Verbeke, A. (2004) PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP. *European Journal of Operations Research*, 153 (2004), 307-317
- Mareschal, B. (2008). *A Multicriteria Approach to Decision Aid: Promethee & GAIA*  
<<http://theses.ulb.ac.be/ETD>> [Consultado: 20 de enero de 2010]
- Mareschal, B., De Smet, Y., Nemery, P. (2006). Rank Reversal in the PROMETHEE II Method: Some New Results  
<[http://userweb.port.ac.uk/~nemeryp/promethee\\_rank\\_reversal.pdf](http://userweb.port.ac.uk/~nemeryp/promethee_rank_reversal.pdf)>. [Consultado: 09 de octubre de 2010]
- Martínez, J., Erdmann, E., Tarifa, E. (2005). *Evaluación de métodos para análisis multicriterio Promethee y AHP* - CONICET, Argentina
- Monteiro, A. (2002) Avaliação dos impactos de uma Universidade Pública Brasileira-*Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa*, Buenos Aires, V. 11, N. 23, P. 69-86, 2002.
- Morais, D. and Almeida, A. (2006). *Water supply system decision making using multicriteria analysis*. Federal University of Pernambuco, Brazil

- Munda, G., (2003). *Between Science and Democracy: the Role of Social Multi-Criteria Evaluation* (SMCE) Groupe de Travail Européen Aide Multicritère à la Décision Série 3, n°7, printemps 2003
- Munier, N. (2004). *Multicriteria Environmental Appraisal – A Practical Guide*, Kluwer Academic Publishers. The Netherlands
- Munier, N. (2010). *Evaluación del impacto ambiental, social y económico en grandes proyectos con énfasis en la sostenibilidad– Metodología de evaluación – Tesina para obtener la titulación de Master*, UPV.
- Munier, N. (2011). *A Strategy for using Multicriteria Analysis in Decision-Making - A Guide for Simple and Complex Environmental Projects-* Springer, Dordrecht, The Netherlands
- Nigim, K., Munier, N., Green, J. (2004). Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources. *Renewable Energy* 29 (2004) 1775–1791
- Noble, B. (2002). *Strategic environmental assessment of Canadian energy policy. Impact Assessment and Projecr Appraisal*, September 2002
- Piantanakulchai, M. (2003). *Analytical Network Process Model for Highway Corridor Planning* - ISAHP 2005, Honolulu, Hawaii, July 8-10, 2003
- Pittsburgh Area Transportation Project (1999). *A note on the selected multicriteria decision - Methods and their applications*. Katz Graduate School of Business University of Pittsburgh
- Romero, C. (1996 a). *Análisis de las decisiones multicriterio*. Isdefe, Madrid
- Romero, C (1996 b). *ELECTRE application for the selection of a fighter bomber aircraft. Análisis de las decisiones multicriterio*. Isdefe, Madrid
- Romero, C. (1991). *Handbook of Critical Issues in Goal Programming*. Pergamon Press, Oxford
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode Electre). *Rev. Fr. Inf. Rech. Oper.* 2 (8) p.-75
- Roy, B. (1985). *Methodologie multicritere d'aide a la decision – Economica*, Paris.
- Saaty, T. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 15: 234-281

- Saaty, T. (1980): *Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, Nueva York
- Saaty, R. (2003) *Decision making in complex environments -The Analytic Network Process (ANP) for Dependence and Feedback* –Rozann W. Saaty
- Sawaragi Y., Nakamori Y. (1992). Shinayakana Systems Approach in Modeling and Decision Support. *Proceedings of the 10th International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, v. 1. Pp. 77-87. Taipei
- Shannon, C.E. (1948) Mathematical Theory of Communication, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948
- Steuer, R. (1989). Multiple criteria optimization: Theory, computation and application. Krieger Publishing Company, Malabar (1989)
- Tasca, L. (2006)). *Tesis doctoral*, Universidad de Milano
- Treitz, M, Schollenberger, H., Schrader, B., Gelderman, J., Rentz, O. (2005) *Multi-Criteria Decision Support for Integrated Technique Assessment*. Paper, University of Karlsruhe, Germany
- Triantaphyllou, E. (2002). *Multi –Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Triantaphyllou, E., Mann, S. (1989). An examination of the effectiveness of multi-dimensional decision making methods: A decision-making paradox. *Decision Support Systems*. Volume 5, Issue 3
- Universidad de Carnegie Mellon -EIO-LCA: *Free, Fast, Easy Life Cycle Assessment* <http://www.eiolca.net/> [Consultado: Febrero 11, 2011]
- Vaidya, O., Kumar, S., (2006) Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operations Research*, 169 (2006) 1-29
- Vincke, P. (1992). *Multicriteria Decision Aid* – John Wiley, Nueva York
- Vreeker, R., Nijkamp, P, Ter Welle, C. (2001). *A multicriteria decision support methodology for evaluating airport expansion plans*. Tinbergen Institute, Amsterdam
- Warner, L., Diab, R. (2002). Use of geographic information systems in an environmental impact assessment of an overhead power line. *Impact Assessment and Project Appraisal*, Volume 20, Number 1, 1 March 2002, pp. 39-47(9)

- Warren, L. (2009). *Uncertainties in the Analytic Hierarchy Process*. AR-013-275  
 <[http://biblioteca.universia.net/irARcurso.do?page=http%3A%2F%2Fhdl.handle.net%2F1947%2F3553&id=42429362N9505/23/57DSTO-TN-0597JTW 02/304](http://biblioteca.universia.net/irARcurso.do?page=http%3A%2F%2Fhdl.handle.net%2F1947%2F3553&id=42429362N9505/23/57DSTO-TN-0597JTW%2F02/304)>.  
 [Consultado: 10 de octubre de 2010]
- Wolfslehner, B. (2002). *Potentials and limitations of multi-criteria analysis methods in assessing sustainable forest management* – Internal paper – Department of Forest and Soil Sciences, Institute of Silviculture, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Peter-Jordanstr. 82, Vienna, Austria.
- Yi-Chun, K (2008). Linear Programming Applications. Essays  
 24.com.Papers.com<<http://www.oppapers.com/essays/Linear-Programming-Applications/276402>> [Consultado: 02 de abril de 2011].
- Zak, C., Wlodarczak, H., Kicinski, M.(2009). *The MCDM Based redesign of the Distribution System*  
 < [http://www.iasi.cnr.it/ewgt/13conference/119\\_zak.pdf](http://www.iasi.cnr.it/ewgt/13conference/119_zak.pdf)>. [Consultado: 19 de junio de 2010]
- Zavala,J., Cruz, M.A.,Vanoye, J., Cruz, M.H. (2007). *Modelo Matemático Multiobjetivo para la Selección de una Cartera de Inversión en la Bolsa Mexicana de Valores* <http://www.uaem.mx/posgrado/mcruz/paper6.pdf>  
 [Consultado: 03 de abril de 2011]
- Zeleny, M. (2000). *New frontiers of decision making for the information technology era*. Published by Yong Shi (University of Nebraska, Omaha & Milan Zeleny (Fordham University, New York)
- Zeleny, M (1974). Linear multi-objective programming – LNEMS 95, Springer, Berlin
- Ziara, M. (2002). *Strategic implementation of infrastructure priority projects: Case study in Palestine*, Centre for Engineering and Planning (CEP)- Palestine

## ARTÍCULOS PUBLICADOS EN EL COMPENDIO

1. Methodology to select a set of urban sustainability indicators to measure the state of the city, and performance assessment  
N. Munier  
Publicado por: *Ecological Indicators* 11 (2011) 1020-1026
2. Economic growth and sustainable development: could multicriteria analysis be used to solve this dichotomy?  
Nolberto Munier  
Publicado por: *Environment, Development and Sustainability* (2005) 00:1-20
3. Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources  
K. Nigim, N. Munier, J. Green  
Publicado por: *Renewable Energy*, 29 (2004) 1775-1791